

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra telekomunikační techniky**

**Měření spektrálních změn zářivých zdrojů pro optické  
komunikace**

Spectral changes measurement of communication radiant sources

**Prohlášení:**

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 2. května 2011

.....

**Poděkování:**

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří mi s prací pomohli, zejména děkuji vedoucímu diplomové práce prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc. za odborné vedení diplomové práce a za obětavou pomoc s teoretickou i praktickou částí této práce. Dále děkuji katedře telekomunikační techniky za možnost vypracování diplomové práce.

## Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o spektrálním složení světla zářivých zdrojů a jeho závislosti na budicím proudu a okolní teplotě. V první části jsou popsány jednotlivé druhy zářivých zdrojů a princip jejich činnosti. V následující části spektrální charakteristiky zdrojů záření a jejich závislost na teplotě a proudu. V další části je uveden popis měřicího pracoviště a přístroje CCD spektrometr, který byl použit při měření spektrálních charakteristik. V poslední části práce je popsáno samotné měření zářivých zdrojů a vyhodnocení dosažených výsledků.

**Klíčová slova:** LED, laserová dioda, zdroje optického záření, spektrální charakteristika, vlnová délka, FWHM

## Abstract

This thesis deals with the spectral composition of light bright sources and its dependence on the excitation current and ambient temperature. The first part describes the different types of radiative sources and principles of their activities. The following spectral characteristics of radiation sources and their dependence on temperature and current. The next section describes the measuring instruments and workplace CCD spectrometer, which was used to measure spectral characteristics. The last part is described the measurement of radiative sources and evaluation of results.

**Keywords:** LED, laser diode, optical radiation source, spectral characteristics, wavelength, FWHM

## Seznam použitých symbolů a zkratek:

A	– anoda
Al	– <i>Aluminium</i> – Hliník
As	– <i>Arsenicum</i> – Arsen
C	– rychlost světla [m/s]
°C	– stupně Celsia
CaP	– galium-fosforid
CCD	– kompaktní univerzální spektrometr
cd	– kandela
CO <sub>2</sub>	– oxid uhličitý
DBF	– <i>Distributed Feed Back</i> – zpětná vazba
DBR	– Distributed Bragg Reflector – distribuovaný braggovský reflektor
DHL	– Lasery s dvojitou heterostrukturou
E	– Energie
eV	– elektron Volt
F	– frekvence [Hz]
FWHM	– <i>Full-Width Half-Maximum</i>
Ga	– <i>Gallium</i> – Gallium
GaAsP	– Galium arsenid fosfid
Gbit/s	– GigaBit za sekundu – jednotka informace 10 <sup>9</sup> bitů za sekundu
GHz	– GigaHertz – jednotka frekvence
h	– Planckova konstanta
HeNe	– helium- neonové
I	– proud [A]
In	– <i>Indium</i> – Indium
IR	– <i>Infra Red</i> – infra červená
I <sub>th</sub>	– prahový proud
K	– katoda
kHz	– kilo Hertz
	– Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zdroj monochromatického
LASER	koherentního světla
LD	– <i>Laser diode</i> – laserová dioda

LED	– <i>Light emitting diode</i> – polovodičová dioda vyzařující nekoherentní světlo
Lm	– lumen
mA	– mili Ampér
MHz	– Mega Hertz
mV	– mili Volt
mW	– mili Watt – jednotka výkonu
nm	– nano metr
ns	– nano sekunda
P	– <i>Phosphorus</i> – Fosfor
Pk	– <i>peak</i> – vrchol
SHL	– Lasery s jednou heterostrukturou
SiC	– karbid křemičitý
SLED	– Superluminiscenční dioda
SM	– single mode
t	– teplota [°C]
VCSEL	– <i>Vertical Cavity Surface Emitting Laser</i> – laser vyzařující z horní plochy čipu
$\lambda$	– vlnová délka [m]
$\lambda_{\text{max.}}$	– vlnová délka odpovídající maximální intenzitě
$\sigma$	– směrodatná odchylka
$\sigma^2$	– rozptyl

# OBSAH

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>7</b>
<b>2 OPTICKÉ ZDROJE.....</b>	<b>9</b>
2.1 Typy interakce.....	9
2.2 Typy optických zdrojů záření.....	11
2.2.1 LED .....	11
2.2.2 Lasery .....	16
<b>3 SPEKTRUM.....</b>	<b>27</b>
3.1 Šířka spektrální čáry a doba života hladiny.....	28
3.1.1 Souvislost mezi vidy a rozměry optického rezonátoru.....	28
3.2 Závislost spektrální distribuce LED na proudu .....	29
3.3 Závislost spektrální distribuce LED na teplotě .....	29
3.4 Závislost spektra LD na teplotě.....	31
<b>4 PRINCIP MĚŘÍCIHO PŘÍSTROJE (OCEANOPTICS RED TIDE USB 650) .....</b>	<b>32</b>
4.1 Princip měření .....	32
4.2 Program Safibra Das 2.0 .....	33
4.3 Uspořádání a složení měřícího pracoviště.....	34
<b>5 MĚŘENÍ PROUDOVÉ ZÁVISLOSTI .....</b>	<b>36</b>
5.1 Měření proudové závislosti spektrálního složení světla LED s vlnovou délkou 650 nm, 610 nm a 470 nm. ....	36
5.2 Měření proudové závislosti spektrálního složení světla laserové diody LD s vlnovou délkou 660 nm.....	42
5.3 Měření proudové závislosti spektrálního složení světla výkonové LED s vlnovou délkou 940 nm .....	44

<b>6 MĚŘENÍ TEPLITNÍ ZÁVISLOSTI .....</b>	<b>47</b>
6.1 Měření teplotní závislosti spektrálního složení světla LED s vlnovou délkou 650 nm, 610 nm a 470 nm. ....	47
6.2 Měření teplotní závislosti spektrálního složení světla LD s vlnovou délkou 660 nm....	54
6.3 Měření teplotní závislosti spektrálního složení světla výkonové LED s vlnovou délkou 940 nm .....	57
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>59</b>
<b>8 LITERATURA .....</b>	<b>61</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>63</b>

# 1 ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá problematikou spektrálního složení světla zářivých zdrojů pro optické komunikace a jeho změnou v závislosti na velikosti budicího proudu a okolní teplotě. Studium spektrálních charakteristik se zabývá obor Spektroskopie. Vznik spektra je podmíněn procesem interakce mezi látkou a elektromagnetickým vlněním. Pro vyhodnocení spektrálních charakteristik se využívá spektrometr.

V současné době se s rozvojem technologie výroby objevuje stále více nových zdrojů záření v podobě laserových a luminiscenčních diod. Zároveň stále více roste počet možností jejich aplikací v různých oborech. Pro využití v telekomunikační technice jsou však vhodné jen některé z nich. Z důvodů velikosti a množství integrace s dalšími komponenty se dnes v telekomunikační technice používají především polovodičové lasery s vysoce koherentním optickým zářením.

V této práci se budu věnovat vlivu proudu a teploty na spektrální složení světla zářivých zdrojů. Budou zde popsány jednotlivé druhy zdrojů záření a jejich rozdělení na monochromatické nekoherentní, do níž spadají polovodičové LED diody a na monochromatické koherentní, ke kterým patří polovodičové lasery. Dále spektrální charakteristiky zdrojů.

V praktické části budu využívat diody několika typů. Jedná se o tři druhy LED vlnových délek  $\lambda=444, 777$  a  $111$  nm, dále jednu LD o vlnové délce  $\lambda=660$  nm a výkonové diody  $\lambda=940$  nm. První část měření bude zaměřena na vliv budicího proudu na změnu spektrálního složení světla jednotlivých LED a LD. Pomocí spektrometru bude měřena změna šířky spektra (FWHM) a posun maxima vlnové délky  $\lambda_{\max}$ . Měření bude prováděno pro rozsah proudů 2 až 30 mA při teplotě 25°C.

Druhá část bude zaměřena na vliv okolní teploty na změny spektrálního složení světla jednotlivých měřených zdrojů. Měření bude prováděno pro teploty 25°C až 50°C. K tomuto měření budu používat speciálního přípravku pro měření vlivu teploty a CCD spektrometru pro vyhodnocení změny spektra. Jednotlivá měření budu pro každý zdroj opakovat, abych se vyhnul chybnému odečtu hodnot. Budu se snažit zamezit vlivu okolního záření na samotné měření. Měření budu popisovat v kapitole 4, 5 a 6. Předpokládám, že naměřené hodnoty budou srovnatelné s teoretickým chováním popsaných zdrojů.



Rád bych těmito měřeními poukázal na rozdílné spektrální závislosti koherentních a nekoherentních zdrojů. Ale i na vliv šířky zakázaného pásu u jednotlivých zdrojů, která je pro použité výrobní materiály charakteristická.

## 2 OPTICKÉ ZDROJE

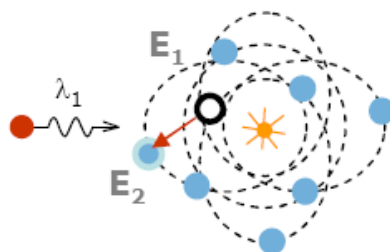
Monochromatické optické zdroje záření dělíme podle jednoduchého kritéria na monochromatické nekoherentní, do níž spadají polovodičové LED diody a na monochromatické koherentní, ke kterým patří polovodičové lasery. Mezi hlavní části optického vysílače patří řídicí obvody a optický zdroj. Řídicí obvod přeměňuje elektrický signál na vyzařovací proud a optický zdroj přemění tento proud na světelný paprsek. Dva hlavní světelné zdroje užívané v telekomunikační technice jsou elektroluminiscenční a laserové diody. Tyto optické zdroje mají několik požadavků. Za prvé, by měly být lineární s elektrickým vstupním signálem, aby minimalizovaly zkreslení a šum. Za druhé, by měly vysílat světlo ve vlnových délkách, které mají nízké ztráty. V poslední řadě by měly mít schopnost udržet stabilní optický výstup při teplotních změnách. Pro polovodičové zdroje záření jsou významné dva procesy:

- absorpce fotonu, která může způsobit přechod elektronů z valenčního do vodivostního pásu a tím generaci páru elektron-díra.
- emise fotonu, k níž může dojít při přechodu elektronu z vodivostního do valenčního pásu. [3]

### 2.1 Typy interakce

#### a) Absorpce záření s excitací elektronu

Při průletu fotonu atomovým obalem může dojít k jeho absorpci a následnému přechodu daného elektronu na jinou kvantovou úroveň s vyšší energií, rozdíl energie mezi předchozí energetickou hladinou a novou je roven energii:  $E=h\nu$  [1]

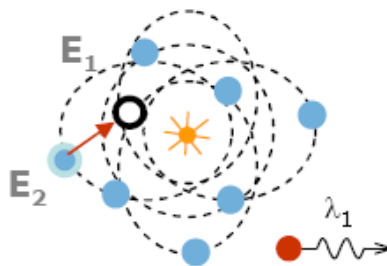


Obrázek 1: Absorpce záření s excitací elektronu [1]

### b) Spontánní emise záření

Elektron může přejít na nižší energetickou hladinu (pokud je volná) a při tomto přechodu předá rozdílnou energii obou hladin atomu ve formě tepla (foton) nebo může dojít ke vzniku fotonu s energií:  $E = h\nu = E_2 - E_1$

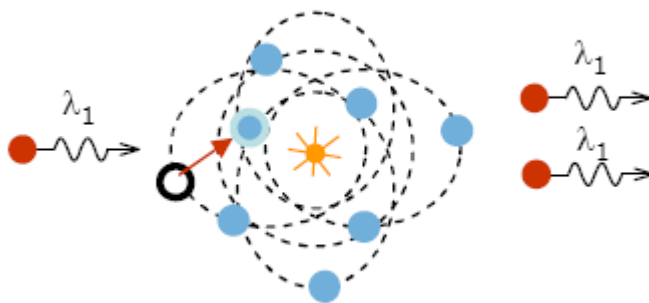
Spontánní je nazývána proto, že nelze určit, kdy k tomuto jevu dojde. [1]



Obrázek 2: Spontánní emise záření [1]

### c) Stimulovaná emise

Pokud je v atomu excitován elektron do vyšší hladiny, může průlet fotonu obalem atomu způsobit jeho přechod do nižší hladiny s tím, že vznikne nový foton s energií rovnou dopadajícímu fotonu. Dopadající foton nezaniká. Nově vygenerovaný foton má stejnou frekvenci, směr, polarizaci a fázi. Tento jev je také z našeho pohledu náhodný. Nicméně, čím více atomů je excitováno na vyšší hladinu, tím je větší pravděpodobnost vzniku stimulované emise nad spontánní – podmínka populační inverze materiálu. [1]



Obrázek 3: Stimulovaná emise [1]

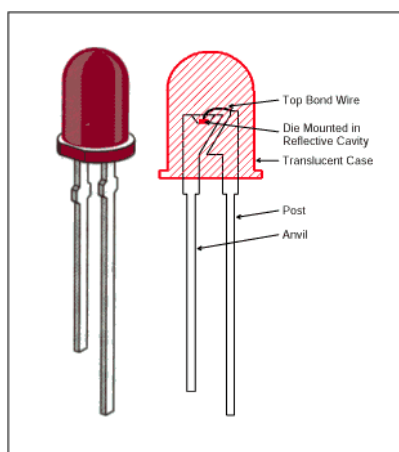
## 2.2 Typy optických zdrojů záření

Optické zdroje rozdělujeme na koherentní a nekoherentní.

- a) Nekoherentní optický zdroj je zdroj, který zvětšuje intenzitu optického vlnění a přitom naopak nezachovává fázi. Mezi tyto pak patří: LED, SLED, výkonové LED.
- b) Monochromaticky koherentní zdroj je zařízení, které zvětšuje amplitudu optického pole, přičemž zachovává jeho fázi. Je-li optické pole na vstupu takového zesilovače monochromatické, je na výstupu rovněž monochromatické se stejnou frekvencí. Výstupní amplituda je větší než vstupní, zatímco fáze se nezmění nebo posune o pevnou hodnotu. Základním principem koherentního zesilování světla je zesilování stimulovanou emisí záření, známé pod akronymem Laser. [15]

### 2.2.1 LED

Název **LED** je odvozen z názvu **L**ight **E**mitting **D**iode, což v překladu znamená dioda, která vyzařuje optické záření. Je to elektronická polovodičová součástka obsahující přechod P-N. Je u ní využíván princip elektroluminiscence, při které je PN přechodem vyzařováno optické záření. Základní princip činnosti je stejný jako u klasické usměrňovací diody. Přiložením napětí v propustném směru dochází k injekci minoritních nosičů elektrického náboje přes PN přechod. Při přechodu elektrických nábojů přes přechod dochází k rekombinaci elektronů s děrami. Vlivem přiloženého elektrického pole přešly elektrony na vyšší energetickou hladinu. [12, 11]



Obrázek 4: Struktura LED diody [13]

Elektron zůstane na vyšší hladině různou dobu, podle toho jak stabilní bude jeho stav. Dříve nebo později však vyšší hladinu opustí a vyzáří elektromagnetické kvantum. Učiní tak sám od sebe, spontánně a proto hovoříme o spontánní emisi záření. Kdy se to stane, je pro každý jednotlivý atom věcí náhody.

Rekombinace jsou pochody, kdy volné elektrony ztrácejí energii a dostávají se na oběžné dráhy v atomech. Rekombinuje-li elektron s dírou, odevzdává atom energii zhruba rovnou šířce zakázaného pásu. Při rekombinaci každého páru elektron – díra se uvolní určité kvantum energie, které se může buď vyzářit mimo krystal, nebo být absorbováno, což se projeví zvýšenou teplotou krystalu.

Vlnová délka energie vyzářené ve formě fotonu je dána rozdílem energií nosiče elektrického náboje před a po rekombinaci (šířce zakázaného pásu). Čím větší je energie, tím má vyzařovaný světelný paprsek kratší vlnovou délku.

Světelné záření opouští LED ve všech směrech, které jsou pro něj průhledné. V oblasti středních proudů je svítivost LED přímo úměrná hustotě proudu v polovodiči. Pravděpodobnost zářivé rekombinace roste se zvětšující se šířkou zakázaného pásu. U křemíku se šířkou zakázaného pásu 1,1 eV je uvolňovaná energie převážně absorbována v krystalu, ze kterého je odváděna přes pouzdro diody do okolního prostředí. Vyrobit-li diodu z GaAs, která má šířku zakázaného pásu 1,34 eV, bude již nezanedbatelná část energie rekombinace vyzařována ve formě fotonů o příslušné vlnové délce, která však ještě spadá do oblasti neviditelného infračerveného záření. Kombinací tohoto materiálu s fosforem, tzv. galium arsenid fosfid, GaAsP, získáme již materiál, který, je-li z něj vytvořen PN přechod, vyzařuje červené viditelné záření. V tabulce 1 je znázorněna vlnová délka LED v závislosti na použitém materiálu. [12]

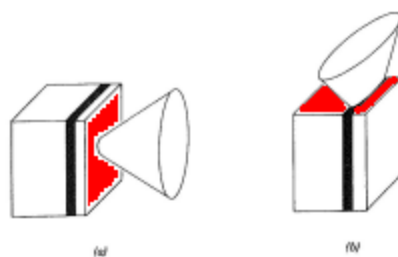
materiál	vlnová délka [nm]	barva
GaAs	910-1020	IR (infra red)
GaAs <sub>0,35</sub> P <sub>0,65</sub>	632	červená
GaAs <sub>0,15</sub> P <sub>0,85</sub>	589	žlutá
GaP	570-700	zelená/červená
SiC	427	modrá

Tabulka 1: Pracovní vlnová délka LED v závislosti na použitém materiálu [12]

Nevýhody luminiscenčních diod jsou malý výstupní výkon a široká optická spektrální šířka pásma, která není vhodná pro vysokorychlostní komunikace. Ačkoli LED diody byly široce používány v komunikacích jako alternativa laseru díky svým zřetelným výhodám, kterými jsou jednodušší výroba, cenová dostupnost, vysoká spolehlivost, menší teplotní závislost, jednodušší řídicí obvody a vyšší linearita.

Luminiscenční diody pracující ve viditelné oblasti, nazývané také svítící diody, pokrývají celé viditelné pásmo. Nejdříve byla z hlediska časové posloupnosti vývoje zvládnuta výroba červených diod, které pracují v širokém rozsahu červených barev (630 nm až 700nm). Zelené svítící diody byly donedávna realizovány na GaP a svítily v oblasti 565 nm až 570 nm v barvě bledě zelené. V současné době jsou na trhu diody na bázi GaInN sytě zelené (525 nm) s vysokou svítivostí až 6 cd při úhlu vyzařování  $15^\circ$ . [12]

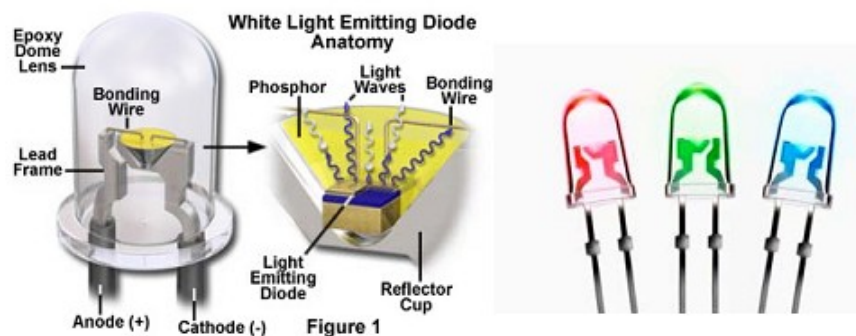
LED mohou být konstruovány buď v plošně nebo hranově vyzařující konfiguraci. Plošně emitující LED emituje záření z plochy součástky rovnoběžně s rovinou přechodu. Záření emitované z protilehlé plochy je pohlceno substrátem a ztraceno nebo se odráží od kovového kontaktu (to je možné při použití průhledného substrátu). Hranově emitující LED vysílá záření z hrany oblasti přechodu. Tato struktura se také obvykle používá pro diodové lasery, ačkoli se začínají stále více používat plošně emitující laserové diody. Plošně vyzařující LED jsou obvykle účinnější nežli hranově emitující. [15]



Obrázek 5: Plošně (a) a hranově (b) vyzařující LED [15]

### a) Kloboučkové LED

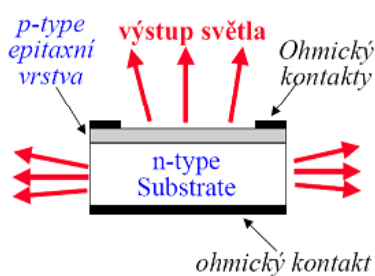
Hemisféra je tvořena n-type GaAs. Průměr kloboučku LED je zvolen tak, aby se maximalizoval výstup světla z povrchu. Díky kloboučku mají vyšší externí výkonovou účinnost než planární. Použití jako světelná indikace. [9]



Obrázek 6: Kloboučkové LED [9]

### b) Planární LED

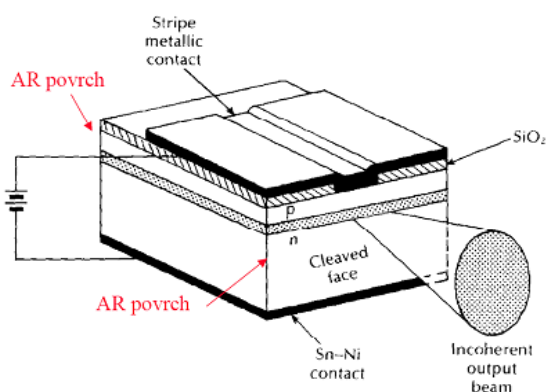
Jsou jednoduché struktury. V místě přechodu vzniká spontánní emise s nízkou zářivostí. Totální odraz omezuje jejich celkový vyzářený výkon. Používají levné plastové obaly. Jsou vhodné pro použití jako světelná indikace. [9]



Obrázek 7: Struktura planární LED [9]

### c) Superluminiscenční dioda SLED

Je zdrojem částečně koherentního záření vzniklého ve spontánní emisí zesílenou stimulovanými přechody. Vniká např. porušením zpětné vazby ve Farby-Perotově rezonátoru laserové diody. Využívá se tam, kde je žádoucí vysoká vnější účinnost laserové diody rychlá přechodová odezva a kde je třeba co nejvyšší úhrnný výstupní výkon v celém spektru emitovaného záření. [17]



Obrázek 8: Struktura superluminiscenční diody SLED [9]

Charakteristické vlastnosti SLED:

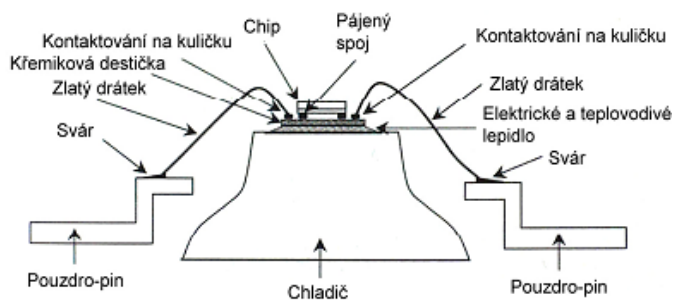
- vysoké výstupní optické výkony (60 mW)
- směrový výstupní svazek (1 mW do SM vlákna)
- směrový výstupní svazek (1 mW do SM vlákna)
- úzká spektrální čára ( $< 40$  nm)
- velká modulační šířka pásma (350 MHz)
- větší závislost na teplotě
- nelineární převodní charakteristika
- směrový výstupní svazek (1 mW do SM vlákna) [9]



#### d) Výkonové LED

Mají větší intenzitu pomoci dvojité heterogenní struktury. Dělí se na bílé a barevné výkonové LED.

- Vstupní optický výkon jednotky wattů (1W, 3W a 5W)
- Lambertovský zdroj záření, světelný tok až 120 lm [9]



Obrázek 9: Struktura výkonové diody [9]

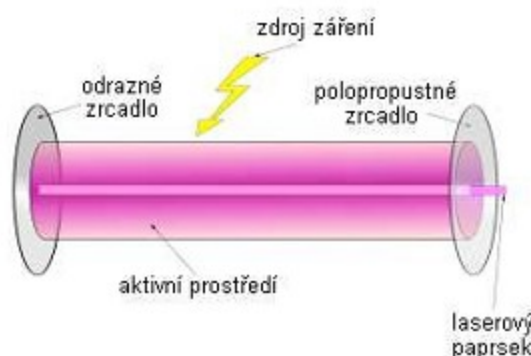
#### 2.2.2 Lasery

Laser je obvykle definován jako zdroj koherentního elektromagnetického záření nejčastěji ve viditelném spektru a v přilehlých oblastech (ultrafialová a infračervená). První „lasery“ se ovšem nazývaly masery a emitovaly záření mikrovlnné, na druhé straně spektra v současné době existují i lasery rentgenové, a hovoří se o vojenských laserech pracujících dokonce v gama oblasti. Například v lékařství se bezesporu budou dříve či později využívat všechny uvedené typy laserů, nyní se však v neinvazní medicíně používají lasery emitující světlo viditelné, případně infračervené.

Laserové záření vzniká konverzí některého druhu energie (např. elektrické, optické, chemické) na záření. Účinnost této přeměny je od zlomku procenta do více než osmdesáti procent (polovodičové), podle typu laseru.

Laser se obecně skládá ze tří základních částí:

- **Aktivní prostředí**, kde se generují fotony a stimuluje jejich vznik, může jím být:
  - pevná látka s příměsemi (krystal, sklo, polovodič);
  - kapalina (barvivové lasery);
  - plyn nebo směs plynů (CO<sub>2</sub>, He + Ne).
- **Optický rezonátor** – přispívá k zesílení, zvyšuje monochromaticnost a směrovost, je tvořen obvykle zrcadly nebo mřížkami a vlnovodem (světlovodem).
- **Zdroje budící energie** (nejčastěji optické – výbojky, jiné lasery) – mohou jimi být:
  - proud elektronů, ať volných, nebo tekoucích p-n přechodem v polovodičích (nejrozšířenější lasery – polovodičové);
  - chemická reakce;
  - nebo potenciálně i jaderný výbuch (vojenství).



Obrázek 10: Struktura laseru [6]

V aktivním prostředí laseru musí nejdříve vzniknout tak zvaná inverze populace nosičů náboje, neboli nerovnovážné obsazení vyšších energetických elektronových hladin. Znamená to, že dostatečné množství elektronů je vnějším, budícím, neboli excitačním polem vybudeno, (excitováno, přesunuto) do vyšších energetických stavů. Foton, který má vhodnou vlnovou délku, neboli energii, a je buď spontánně (samovolně) generovaný v aktivní oblasti, nebo přiletí z vnějšku, interaguje s vybudenými elektrony tak, že při přeskokách těchto elektronů zpět na nižší energetické hladiny vzniká nový foton stejných parametrů (barva, směr, polarizace, fáze), jaké měl foton stimulující. Řečeno jinými slovy, z vhodného vnějšího zdroje energie (například

elektrické energie) se v laseru lavinovitě tvoří (s velkou účinností) identické fotony (hlavně z hlediska energie, tzn. barvy a polarizace) a jsou emitovány stejným směrem a (obvykle) s velmi vysokou hustotou energie. [7]

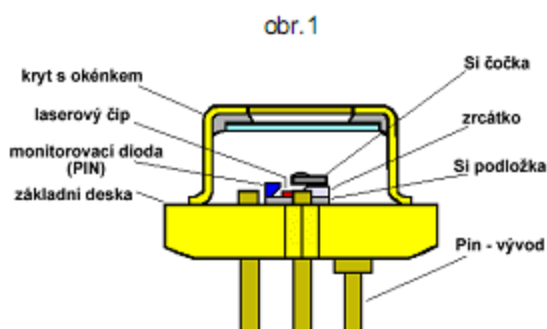
Obecně vzato, laserové záření může mít vlnovou délku od gama záření přes rentgenové ultrafialové a viditelné vlnové délky až po mikrovlnné záření. Lasery emitující ve spektrální oblasti gama záření se nazývají grasy a v mikrovlnném spektru masery. [7]

Další vlastnosti laserového záření, jako jsou:

- fázová koherence – světelné vlny jsou stejné nejen z hlediska frekvence (monochromatickosti), ale nejsou vůči sobě ani posunuté – jsou ve fázi,
- polarizace – příčné vlny elektromagnetického záření kmitají ve stejné rovině, jsou stejně polarizovány, jsou principiálně velmi významné a zajímavé a jsou využívány i v řadě fyzikálních experimentů a technických aplikací.
- prahový budicí výkon – laser začne vyzařovat „laserové“, tj. koherentní, stimulované, monochromatické a polarizované světlo teprve od určité, prahové budicí energie. Její velikost je dána vlastnostmi aktivního prostředí, tedy snadností, s jakou je možné dosáhnout inverze populace, a též konstrukcí laseru – hlavně objemem aktivní oblasti. Významnou roli může hrát i typ a kvalita rezonátorů.
- maximální výkon – je omezen hlavně odolností zrcadel rezonátoru, odvodem a rozptylem parazitního tepla z aktivní oblasti, které tam vzniká při nežádoucích nežářivých procesech. Předpokladem je to, že je k dispozici dostatek budicí energie.
- životnost, spolehlivost – je dána rychlostí degradačních mechanismů v aktivním prostředí změnou zářivé rekombinace v nežářivou. V případě vyšších hustot záření i mechanickou degradací zrcadel rezonátoru. Spolehlivost je určena hlavně elektronikou budicího systému a statistickým chováním degradačních mechanismů. Obecně platí, že vyšší provozní teploty životnost snižují, stejně jako rostoucí opakovací frekvence či výkon.
- Délka impulsu – horní mez pro impulzní lasery je dána fyzikálními parametry odvodu parazitního tepla vznikajícího v aktivní oblasti, která se při delších impulsích přehřívá. Lasery s délkou impulsu větší než milisekunda se obvykle označují jako kvazikontinuální.

- maximální a minimální opakovací frekvence – je dána konstrukcí laseru a budicím systémem. Součin délky impulzu a opakovací frekvence se nazývá plnění.
- stabilita signálu, šum, fluktuace – spíše než fyzikální vlastnosti aktivního prostředí je zde většinou určující stabilita zdroje. [7]

Polovodičové lasery (laserové diody, LD) jsou na optickém výstupu pouzdra opatřeny buď okénkem (pro záření do volného prostoru) nebo (jsou-li určeny pro záření do vlákna) tzv. „pigtailem” – kouskem optického vlákna, do kterého je výkon LD s určitými ztrátami zaveden. LD mohou pracovat v kontinuálním nebo impulsním režimu. Pracuje-li LD v kontinuálním režimu, bývá hodnota optického výkonu 0,1 mW až 100mW. V impulsním režimu lze dosáhnout výkonu řádově hodnoty 100W při šířce impulsu 100 ns. Prahová hodnota budicího proudu např. u kontinuálně pracujících LD s optickým výkonem 10 mW je přibližně 40 mA. [17]



Obrázek 11: Struktura polovodičového laseru [10]

Použití LD je velmi rozsáhlé. V některých případech slouží jako optické budicí zdroje jiných pevnolátkových laserů. Známé je použití LD v laserových tiskárnách, čtečkách čárového kódu apod. Velmi významné je použití LD v komunikacích. Doba náběhu komunikačních LD bývá menší než 1 s. LD pracují v typických spektrálních oknech: 850 nm, 1300 nm a 1550 nm.

Hlavní výhody LD spočívají v jejich snadné přímé modulaci budicím proudem. Šířka pásma přenosu může dosáhnout řádově hodnoty několik GHz. LD mají malé rozměry (lineární rozměry pouzdra obvykle nejsou větší než několik mm). Dobrá cenová dostupnost je nabízena u LD pracujících ve spektrálním okně 850 nm. [17]

## Dělení jednotlivých typů laserových diod

a) Dle vnitřní struktury:

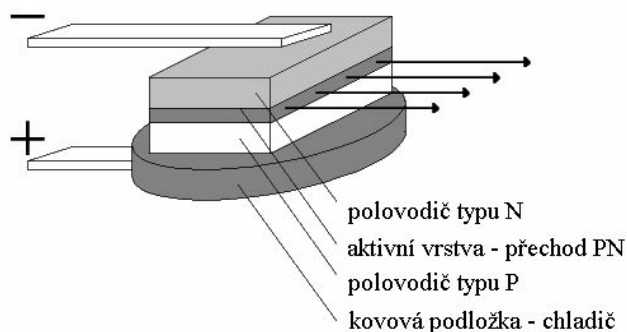
- 1) Homostrukturní lasery (Homomaterial Laser) "HoL"
- 2) Heterostrukturní lasery (Heteromaterial Laser) "HL"
- 3) Lasery s rozloženou zpětnou vazbou (Distributed Feed Back Laser) "DBFL"
  - Lasery s Braggovými zrcadly - DBR (Distributed Bragg Reflector)
  - Lasery Fabry-Perot
- 4) Lasery s kvantovými jámami, Quantum Wells Laser "QWL"

b) Dle konstrukce - místa vyzařování:

- 5) Hranově vyzařující lasery (Edge Emitting Laser) "EEL"
- 6) Plošně vyzařující lasery (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) "VCSEL"

### 1) Homostrukturní lasery

Na tomto typu polovodičového laseru bylo poprvé dosaženo v r. 1962 emise koherentního záření (GaAs). Je v podstatě tvořen přechodem PN obrázek 12. Neexistuje zde výrazná skoková změna indexu lomu, která by podmiňovala optické soustředění, ani vysoká potenciálová bariéra zajišťující soustředění nosičů náboje. Šířka rekombinační oblasti (aktivní vrstvy) je v podstatě určena difúzní délkou menšinových nosičů (pro silně dopovaný GaAs 1 – 3 mm). Záření se soustřeďuje vlivem gradientu indexu lomu a vlivem rozdílu koncentrace nosičů náboje. [2]



Obrázek 12 : Homostrukturní laser [10]

Díky velké šířce aktivní oblasti jsou třeba velké prahové hustoty proudu. Při generaci záření dochází vlivem úniku záření do okolních vrstev polovodiče ke ztrátám a z toho pramení malá účinnost laseru. Při jeho provozu je nutné dostatečné chlazení. [10]

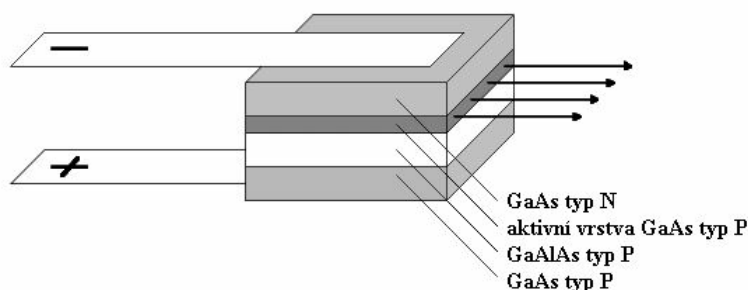
## 2) Heterostrukturní lasery

V těchto typech laseru s heteropřechody je vymezení vlnovodu dáno skokovou změnou indexu lomu v oblasti heteropřechodu, která je funkcí rozdílu šířky zakázaného pásu sousedních vrstev heterostruktury (krystalická vrstevnatá struktura obsahující alespoň jednu epitaxní vrstvu odlišného chemického složení než je složení podložky, u polovodičových laserů je důležité přizpůsobení mřížkových parametru).

Současně s účinným vedením světla zabezpečuje heterostruktura i podmínky k účinnému soustředění menšinových nosičů. Působením heteropřechodu se soustřeďuje záření a injektové nosiče do zvolených oblastí, přičemž oblast soustředění záření (optický vlnovod) může být totožná s oblastí soustředění nosičů (aktivní oblastí) nebo se od ní může lišit. Podle počtu heteropřechodů dělíme HL na lasery s jednou heterostrukturou (SingleHL) a s dvojitou heterostrukturou (DoubleHL). [4]

- **Lasery s jednou heterostrukturou SHL**

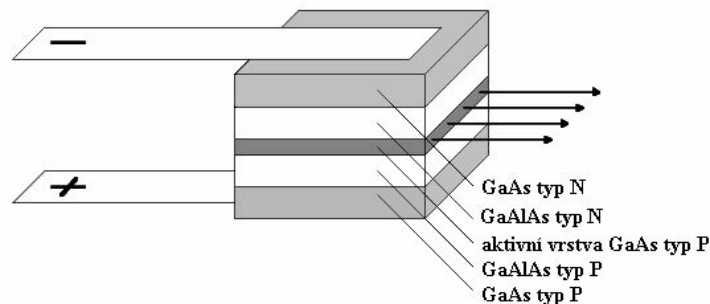
V jednoduché heterostruktuře SHL, která je zobrazena na obrázku 13, vytváří heteropřechod jednu ze stěn vlnovodu a současně i potenciálovou bariéru soustřeďující nosiče uvnitř aktivní vrstvy typu P. Skoková změna indexu lomu je zde mnohem větší než u homopřechodu. Přechodem PN a heteropřechodem je vymezen asymetrický vlnovod. Hodnoty proudových hustot klesají asi na pětinu hodnoty dosahované u homostrukturních laseru. [2]



Obrázek 13 : Lasery s jednou heterostrukturou [2]

- **Lasery s dvojitou heterostrukturou DHL**

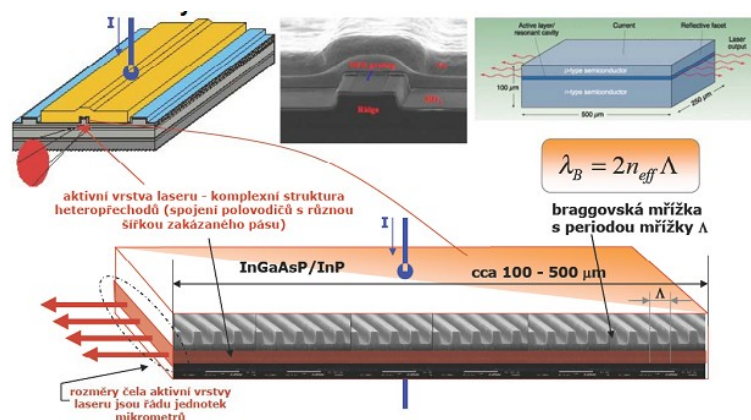
Mají aktivní vrstvu obklopenou z obou stran vrstvami s větší šířkou zakázaného pásu, nosiče náboje i optické záření jsou soustřeďovány do aktivní oblasti z obou stran, tedy i s větší účinností. Oblast rekombinace je u DHL přesně definována. Nedochozí zde k „roztékání“ nosičů náboje do okolních vrstev. Nahromadění nosičů náboje v aktivní vrstvě je vzhledem k jejímu malému průřezu (až 100nm) je tak velké, že režimu laserování se dosahuje už při prahových proudech několika desítek mA. Účinnost je velmi vysoká, kolem 75%. [4]



Obrázek 14: Lasery s dvojitou heterostrukturou [2]

### 3) Lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou - DFB (Distributed)

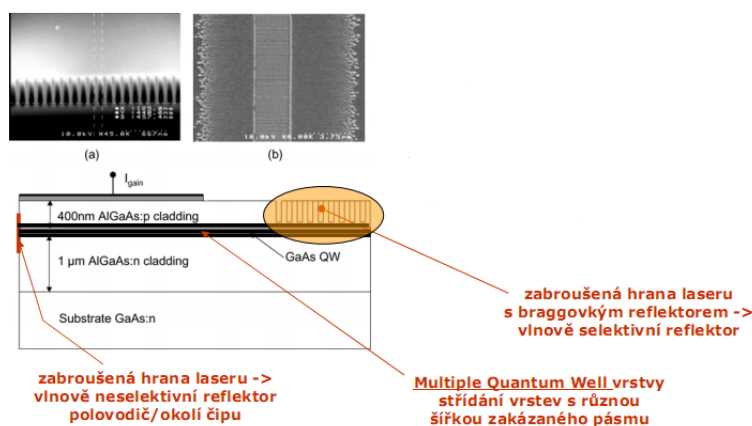
Polovodičové lasery, v nichž se zpětná vazba uskutečňuje díky prostorovým periodickým strukturám, se nazývají lasery s rozprostřenou zpětnou vazbou a jejich funkce je založena na periodické změně indexu lomu ve směru šíření. Zpětná vazba v dutině vzniká v důsledku toho, že elektromagnetická vlna šířící se jedním směrem je trvale vázána do opačného směru braggovským rozptylem.



Obrázek 15 : Laser s rozprostřenou zpětnou vazbou DFB [9]

- Lasery s Braggovými zrcadly - DBR (Distributed Bragg Reflector)

U laserů s Braggovými zrcadly je periodická mřížka horizontálně posunuta mimo aktivní oblast laseru tak, aby neovlivňovala průběh procesů. Tímto posunutím se oblast generace záření a oblast kladné zpětné vazby prostorově rozdělí. Struktura se skládá z identických podsystémů A a B propojených optickou mřížkou nanesenou na vlnovodnou vrstvu  $\text{Al}_{0,15}\text{Ga}_{0,85}\text{As}$  typu N. Nechť podsystém A je generátor optického záření. Tloušťka aktivní oblasti se směrem k optické mřížce rovnoměrně zmenšuje. Postupným zmenšováním tloušťky aktivní oblasti dosáhneme toho, že záření z ní přechází do vlnovodu s nanesenou optickou mřížkou, která tvoří frekvenčně selektivní reflektor. Podsystém B není vybuzen a může sloužit k detekci nebo modulaci postupné vlny přicházející z podsystému A. Výstupní optický signál můžeme odebírat ze zrcadla vytvořeného štěpnou plochou laseru. [4]



Obrázek 16 : Lasery s Braggovými zrcadly [9]

Lasery s Braggovými zrcadly jsou vhodnými zdroji pro systémy integrované optiky (pásmo 1,3 – 1,55  $\mu\text{m}$ ) neboť nahrazením Fabryho - Perotova rezonátoru optickou mřížkou umožňují jednovidový provoz při kvalitním napojení na optický vlnovod. Další vítanou vlastností těchto laserů je jejich slučitelnost s planárními vlnovody připravenými na jediné podložce, tedy jejich snadná výroba. DFB lasery dosahují velmi úzké spektrální šířky (pod 1 nm) a poskytují modulační šířku pásma hluboko do oblasti GHz. Používají se v mnoha aplikacích včetně komunikací optickými vlákny pro vlnové délky 1300 a 1550 nm. [4]

- Fabry – Perot lasery

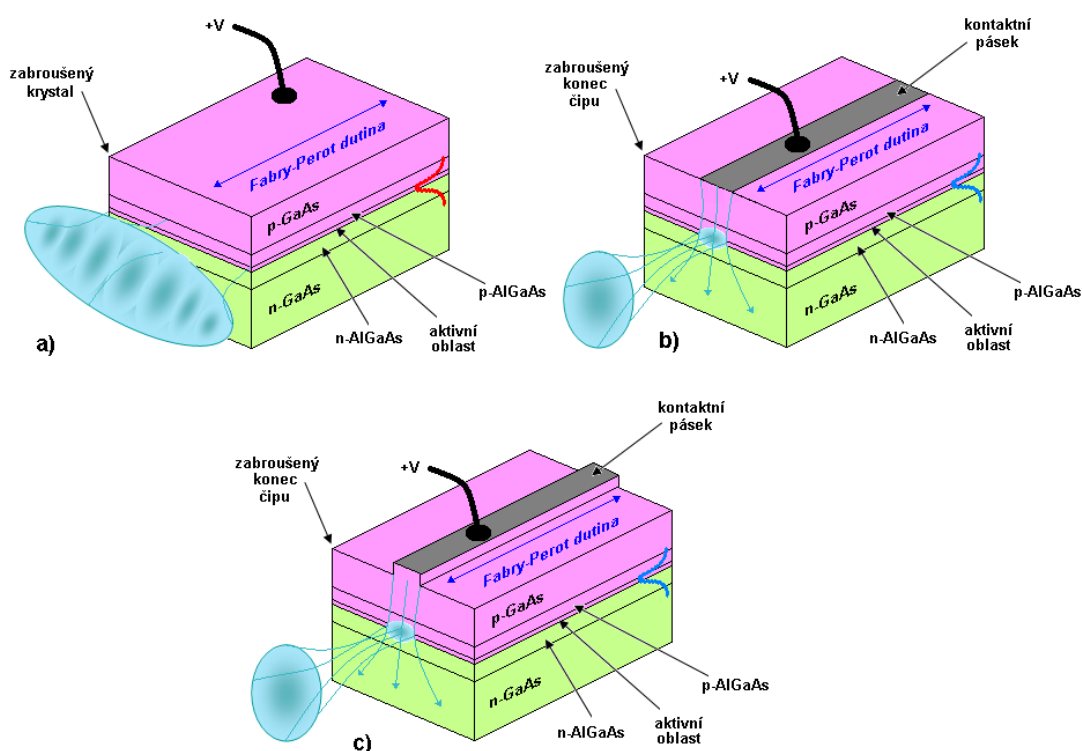
Fabry-Perot (FP) laser je mnohamódový laser. Rezonátor u Fabry-Perot laserů omezuje



vlny na stojaté. U ostatních vln je skoková změna fáze a proto se nešíří. Podmínka, pro kterou se mohou šířit v rezonátoru pouze stojaté vlny je vyjádřena

$$n \cdot L = \sqrt{\frac{\lambda}{2}} \quad [10]$$

Rezonátor podporuje podélné módy laseru. Je několik typů laserů s Fabry-Perot dutinou, které jsou zobrazeny na obrázku 17. Obrázek 17 (a) zobrazuje laser bez laterálního omezení, který má vícebodový výstupní svazek s velkou divergencí svazku. Tento typ laseru s Fabry-Perot rezonátorem se dnes již používá velmi málo a to z důvodu nestabilního režimu. Obrázek 17 (b) ukazuje laser s laterálním omezením řízený ziskem. V laterálním směru se rezonátor omezí průchozím proudem, v této části se zvýší index lomu. Je to jednoduché řešení, ale je nestabilní, při modulaci dochází k přeskokování vidů. Na obrázku 17 (c) je opět laser s laterálním omezením, ale tentokrát je řízený indexem lomu. Nyní je v laterálním směru rezonátor omezený indexem lomu, tím se vytvoří vlnovod. Režim je stabilní, při modulaci nedochází k přeskokování vidů [1].



Obrázek 17: Lasery s Fabry-Perot rezonátorem; a) Laser bez laterálního omezení; b),c) s laterálním omezením [14]

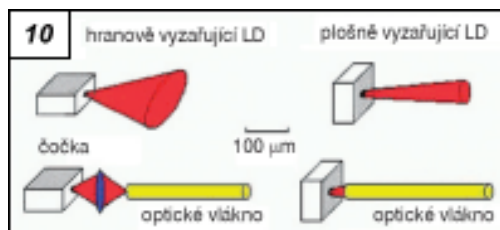
#### 4) Lasery s kvantovými jámami

Tento typ, označovaný Quantum Wells Laser – QWL má dvojistou heterostrukturu. Její aktivní vrstva (označovaná jako kvantová jáma), liší se složením, je tak tenká, že se při generaci optického záření uplatňují kvantové jevy podmíněné její tloušťkou. Zde představuje DH pravoúhlou potenciálovou jámu ve vodivostním i valenčním pásu polovodiče. Jestliže jsou rozměry vrstvy srovnatelné s de Broglieho vlnovou délkou (v tepelné rovnováze elektronů) může elektron nabývat jen určitých energií, které odpovídají vlnovým délkám, jež jsou násobkem těchto miniaturních rozměrů aktivní vrstvy.

Epitaxní technologie umožňují realizovat lasery s tloušťkami kvantové jámy menšími než 20 nm. Současnými technologiemi lze uskutečňovat vrstvy tvořené pouze jedinou atomovou rovinou. Takto je možné získat PL s velmi úzkou spektrální charakteristikou. Teplotní závislost prahového proudu  $I_p$  přitom je mírnější než u předchozích typů PL. Běžná tloušťka aktivní vrstvy je 10 nm. Prahové proudy pro SQWL jsou přibližně v rozmezí od desetin miliampérů po několik málo desítek miliampérů. Účinnost těchto typů laserů může překročit až 80 %. Výstupní optický výkon běžně dosahuje desítek miliwattů v kontinuálním režimu (MQWL). [14]

#### 5) Hranově vyzařující lasery

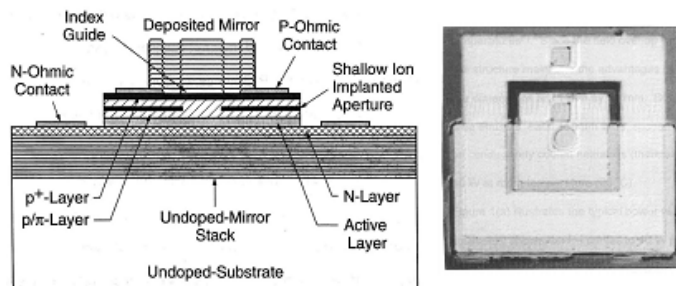
Tento typ konstrukce polovodičových laserů - laserových diod (Edge Emiting Lasers - EEL) vysílá záření z hrany přechodu. Ve výrobě i aplikacích laserových diod zatím převládá. Principiální schéma z hlediska vyzařování je vidět na obrázku 18. Stále více se však uplatňují plošně vyzařující typy konstrukce LD (VCSEL). [4]



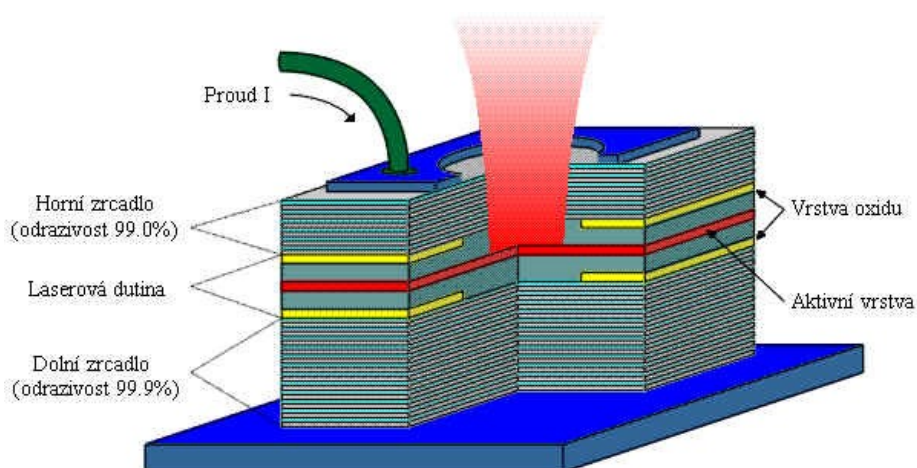
Obrázek 18 : Hranově a plošně vyzařující LD [10]

## 6) Plošně vyzařující lasery

VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) emitují záření z plochy součástky rovnoběžné s rovinou přechodu. Záření emitované z plochy je pohlceno substrátem a ztraceno nebo, což je výhodnější, se odráží od kovového kontaktu (tj. možné při použití transparentního substrátu). Tento typ konstrukce bývá účinnější nežli hranově emitující LD (EEL). Při navazování světelného záření z VCSEL do optického vlákna bez dalších optických komponent se dosahuje účinnosti až 80%. [4]



Obrázek 19: Plošně vyzařující laser VCSEL [8]



Obrázek 20: Plošně vyzařující laser VCSEL [10]

### 3 SPEKTRUM

- Elektromagnetické spektrum (někdy zvané Maxwellova duha) zahrnuje elektromagnetické záření všech možných vlnových délek. Elektromagnetické záření o vlnové délce  $\lambda$  (ve vakuu) má frekvenci  $f$  a jemu připisovaný foton má energii  $E$ . Vztah mezi nimi vyjadřují následující rovnice:

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad E = hf$$

kde  $c$  je rychlost světla ( $3 \times 10^8$  m/s) a  $h = 6.65 \times 10^{-34}$  J·s = 4.1  $\mu$ eV/GHz je Planckova konstanta.

Barva	Rozsah	Rozsah <u>frekvencí</u>
<u>červená</u>	~ 625 – 800 nm	~ 480 – 375 THz
<u>oranžová</u>	~ 590 – 625 nm	~ 510 – 480 THz
<u>žlutá</u>	~ 565 – 590 nm	~ 530 – 510 THz
<u>zelená</u>	~ 520 – 565 nm	~ 580 – 530 THz
<u>tyrkysová</u>	~ 500 – 520 nm	~ 600 – 580 THz
<u>modrá</u>	~ 430 – 500 nm	~ 700 – 600 THz
<u>fialová</u>	~ 400 – 430 nm	~ 750 – 700 THz

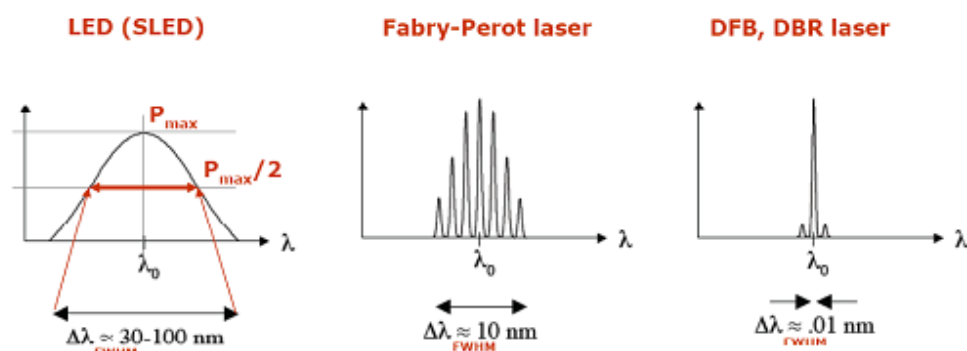
Tabulka 2: Rozsah vlnové délky a frekvence viditelného světla

- Emisní spektrum je takové spektrum, jež je vytvářeno světlem vysílaným světelným zdrojem, přičemž světlo na cestě od zdroje až k místu spektra neprochází žádným prostředím, jež by je znatelně pozměňovalo. Prochází-li světlo ze zdroje prostředím, které část záření pohlcuje, vzniká spektrum absorpční. Spektrem emisním zkoumáme světelný zdroj, spektrem absorpčním prostředí, kterým světlo prochází. [5]

- Spektrum laserových diod je soubor vlnových délek, na kterých laserová dioda vyzařuje. Oproti luminiscenční LED diodě (šířka spektra až 100 nm) je spektrum laserové diody velmi úzké (desetiny až jednotky nm), což dovoluje přenos po optickém vlákně na velké vzdálenosti bez zkreslení signálu. Typické spektrum laserové diody s Fabry - Perotovým rezonátorem obsahuje několik podélných módů (longitudinal modes), jejichž vlnová délka je daná rezonátorem, resp. jeho délkou a materiálem. [4]

### 3.1 Šířka spektrální čáry a doba života hladiny

Atomy mohou uskutečňovat přechody mezi energetickými hladinami jak zářivým, tak nezářivým procesem. Zářivé přechody jsou doprovázeny absorpcí a emisí fotonu. Nezářivé přechody dovolují přenos energie prostřednictvím mřížkové vibrace, nepružné srážky mezi atomy a nepružné srážky se stěnami nádoby. Každá atomová hladina má dobu života  $\tau$ , která převrácenou hodnotou rychlosti s jakou její obsazení ubývá – zářivé či nezářivé – a přesouvá se na nižší hladiny. Šířka spektrální čáry je v podstatě projevem Fourierovy transformace. [15]



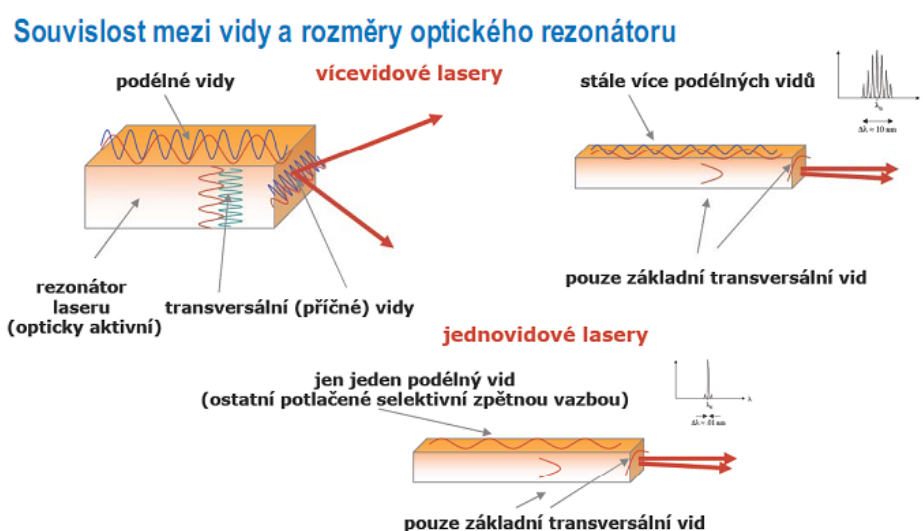
Obrázek 21: Vzájemné porovnání spektra LED a LD [1]

#### 3.1.1 Souvislost mezi vidy a rozměry optického rezonátoru

Každý vid má také jiné prostorové rozložení, což při jeho částečném vyvázání mimo rezonátor zhoršuje kvalitu výstupního vyzářeného optického pole – příčinou jsou vidy transversální, tj. ty, které vznikají v rezonátoru kolmo na směr výstupního svazku.

Transverzální vidy se dají odstranit např. malými příčnými rozměry rezonátoru. Více podélných vidů zhoršuje spektrum laseru, protože každý vid nese optické pole s jinou diskretní

vlnovou délkou (frekvencí). Podélné vidy se dají odstranit tak, že se na daných frekvencích jednotlivých podélných vidů záměrně selektivně zvýší útlum rezonátoru, čímž na nich přestane laser opticky oscilovat – nebude na nich zářit. [9]



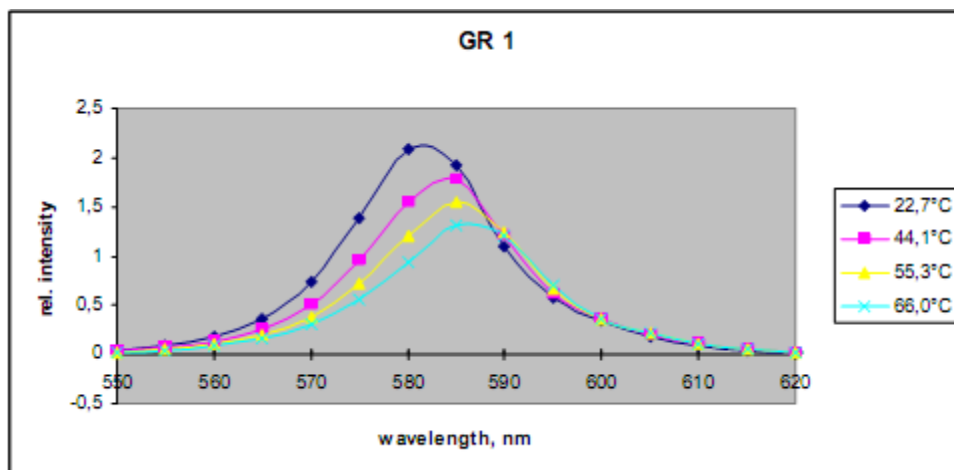
Obrázek 22: Souvislost mezi vidy a rozměry optického rezonátoru [1]

### 3.2 Závislost spektrální distribuce LED na proudu

Obecně lze říci, že se světelný tok LED se zvětšujícím se proudem zvyšuje. Tato skutečnost se zdá být příznivá – čím větší bude protékající proud, tím více světelného toku bude LED emitovat. Zmíněnou závislost lze však využít k trvalému provozu pouze v oblasti od minimálních do jmenovitých hodnot proudu. Proudová zatížení v oblasti nad jmenovitými hodnotami je možné využít pouze pro krátkodobý či pulzní provoz. [8]

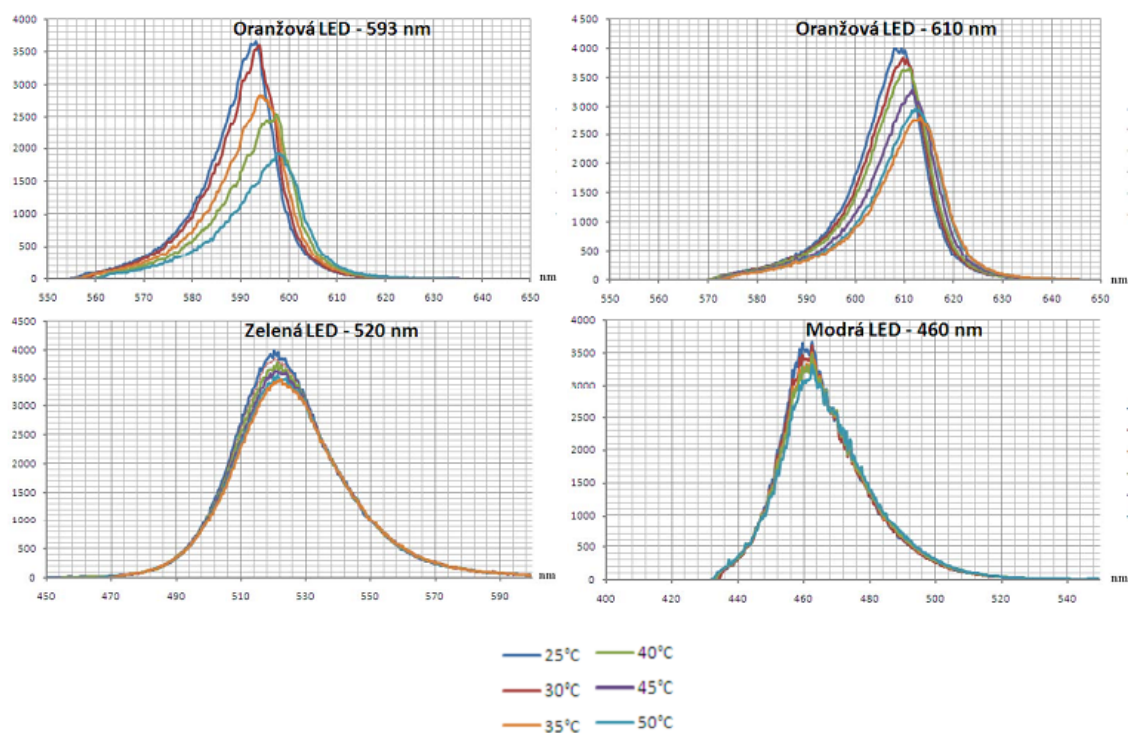
### 3.3 Závislost spektrální distribuce LED na teplotě

Diody LED jsou polovodičová zařízení a jejich elektrické a optické charakteristiky jsou teplotně závislé. Vedle intenzity výstupu, se mění s teplotou také spektrální distribuce LED viz graf 1. Chceme-li dosáhnout maximální světelný výkon, musí být LED provozována za stálé teploty. [8]



Graf 1: Závislost výkonu LED na teplotě [8]

Graf 2 znázorňuje závislost LED různých vlnových délek na teplotě. U modré LED se závislost na teplotě jeví jako nejmenší.



Graf 2: Závislost výkonu jednotlivých LED na teplotě [9]

### **3.4 Závislost spektra LD na teplotě**

Spektrum laserových diod je závislé na teplotě. S rostoucí teplotou (krystal se roztahuje a index lomu materiálu se zvětšuje) se posouvá spektrum směrem k vyšším hodnotám vlnových délek. V podstatě se jedná o drift jednotlivých podélných módů. Jelikož je spektrum teplotně závislé, bude se měnit také s rostoucím proudem laserové diody v propustném směru (roste Joulovo teplo a čip LD se více zahřívá). Při změnách proudu pak můžeme pozorovat přelévání části energie z jednoho podélného módu do druhého, tedy nespojitě změny vlnové délky hlavního píku. Tento jev se nazývá "mode hopping". Tento jev je dominantní pro laserové diody s Fabry - Perotovým rezonátorem. [4]



## 4 PRINCIP MĚŘÍCÍHO PŘÍSTROJE (OCEANOPTICS RED TIDE USB 650)

Je to kompaktní univerzální spektrometr pro méně náročné aplikace, který pokrývá spektrální pásmo 350 – 1000 nm, s rozlišením 2 nm. K počítači je připojen přes rozhraní USB obrázek 23. Jeho zásadním parametrem je optické rozlišení, tedy nejmenší změřitelná šířka spektra (FulmWidth Half Maximum FWHM).



Obrázek 23: Zařízení OceanOptics Red Tide USB 650

### 4.1 Princip měření

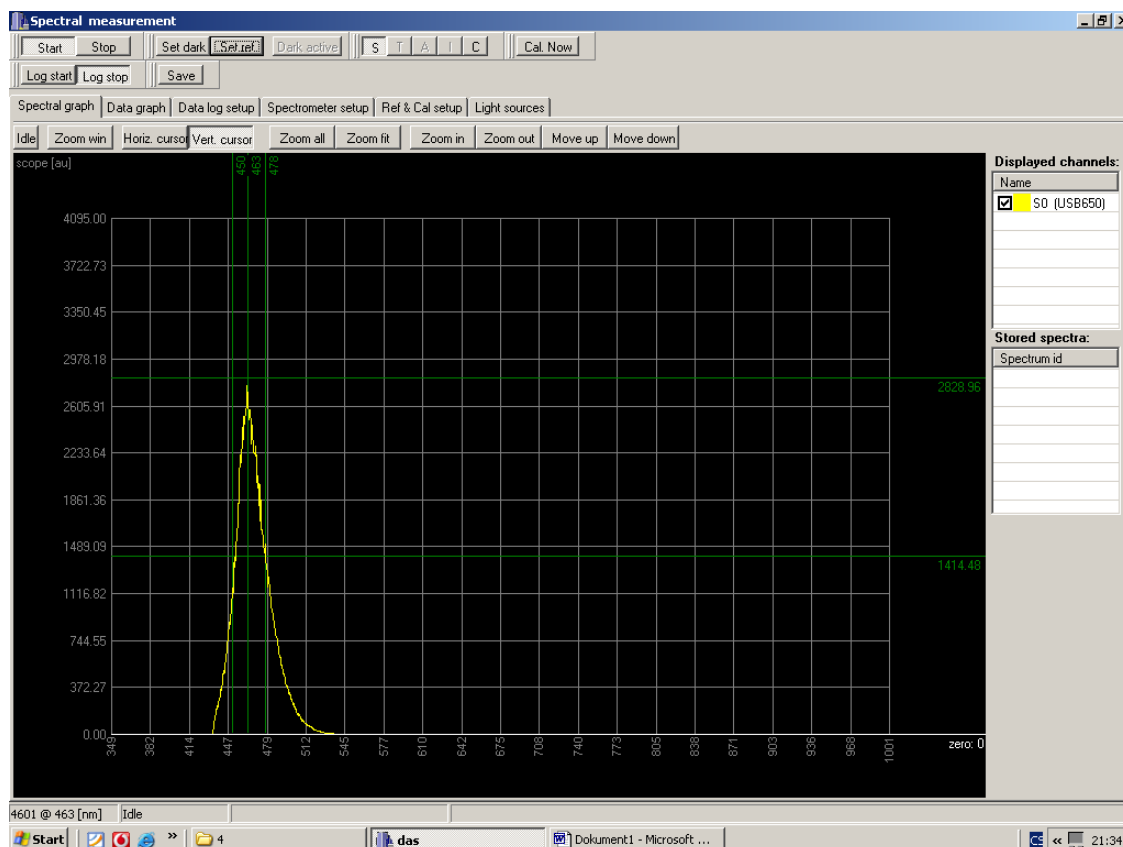
Nejdříve je paprsek světla vázán do optického vlákna, ze kterého vstupuje přes vstupní štěrbinu do spektrometru. Světlo dopadá na sférické zrcadlo, na kterém dojde k vytvoření rovnoběžného svazku světla. Toto světlo dopadá na difrakční mřížku, která jej rozkládá na jednotlivé spektrální složky vlnové délky. Ty potom dopadají na další sférické zrcadlo, které je zaostřuje a směřuje na lineární CCD detektor. Výsledný signál je převeden do digitální podoby a pomocí počítače zpracován na výsledný spektrální průběh.

Je třeba si uvědomit, že pro tento typ aplikací není spektrometr kalibrován a absolutní měřený průběh je tak do jisté míry zkreslen. Zkreslení je dáno spektrálními charakteristikami prvků, které jsou součástí optické cesty od zdroje až po detektor. Je to především optické propojovací kabely, kolimační optika držáku kyvet – čočky, difrakční mřížka a CCD detektor záření. Pro relativní měření, kdy je porovnáno více průběhů není kalibrace nutná. Pro absolutní měření je možné kalibraci za pomoci kalibračního zdroje provést. [16]

## 4.2 Program Safibra Das 2.0

Je to uživatelské rozhraní, které umožňuje zobrazení, upravení a následné uložení spektrálních charakteristik měřených zdrojů záření. Rozhraní je rozděleno na dvě části graf 3. Horní část obrazovky slouží pro nastavování a ovládání parametrů programu pomocí tlačítek. Dolní část slouží pro zobrazení měřených spekter.

Při měření nejdříve zmáčkne tlačítko **Start** pro spuštění a zobrazí se nám spektrum měřeného zdroje. Potom provedeme úpravu hodnoty integračního času pomocí tlačítek **Spectrometer setup** a **Integration time**, tak aby nedocházelo u zobrazovaného spektra k saturaci. Opět se vrátíme k zobrazenému spektru pomocí tlačítka **Spectral graph** a provedeme umístění vertikálních a horizontálních příček pro zjištění hodnot  $\lambda_{\text{max}}$  a FWHM. Následně provedeme uložení naměřených hodnot pro další zpracování pomocí tlačítka **Data log setup** a **Save**. Stejným způsobem postupujeme pro všechna měření.



Graf 3: Uživatelské rozhraní Safibra Das 2.0

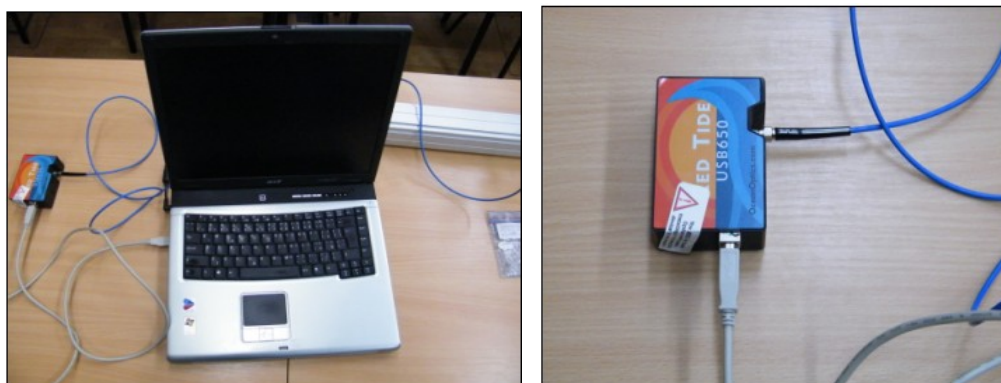
### 4.3 Uspořádání a složení měřicího pracoviště

Pro měření jsem použil přístroje, které jsou zobrazeny na obrázku 24, které se běžně využívají na katedře telekomunikační techniky FEI VŠB - TUO pro standardní laboratorní měření ve výuce. Jedná se o přípravek *Metering of thermal dependence*, obrázek 24, díky němuž lze měnit hodnotu budicího proudu a teplotu v okolí měřených zdrojů optického záření LED a LD.



Obrázek 24: Přípravek pro měření vlivu teploty a proudu na optické zdroje záření

Dále jsem použil přístroj pro měření spektrálních charakteristik CCD spektrometr *OceanOptics Red Tide USB650m*, obrázek 25, jenž společně s PC a software *Safibra 2.0* umožňuje zobrazení spektra daného zdroje záření, jeho upravení a uložení naměřených hodnot, důležitých pro další zpracování.



Obrázek 25: OceanOptics Red Tide USB650 a PC se Safibra Das 2.0

Pro měření jsem použil tyto optické zdroje záření obrázek 5 LED ELD-650-523 o vlnové délce  $\lambda=650$  nm (červená), LED B5-435-30S o vlnové délce  $\lambda=610$  nm (oranžová), LED B5B-437-IX o vlnové délce  $\lambda=470$  nm (modrá), LD XT-66C4 o vlnové délce a výkonové LED o vlnové délce  $\lambda=940$  nm. Katalogové listy jednotlivých zdrojů záření jsou uvedeny v příloze II.



Obrázek 26: Měřené optické zdroje záření

Zapojení pracoviště pro měření závislosti spektrálních charakteristik na budícím proudu a okolní teplotě - obrázek 27.

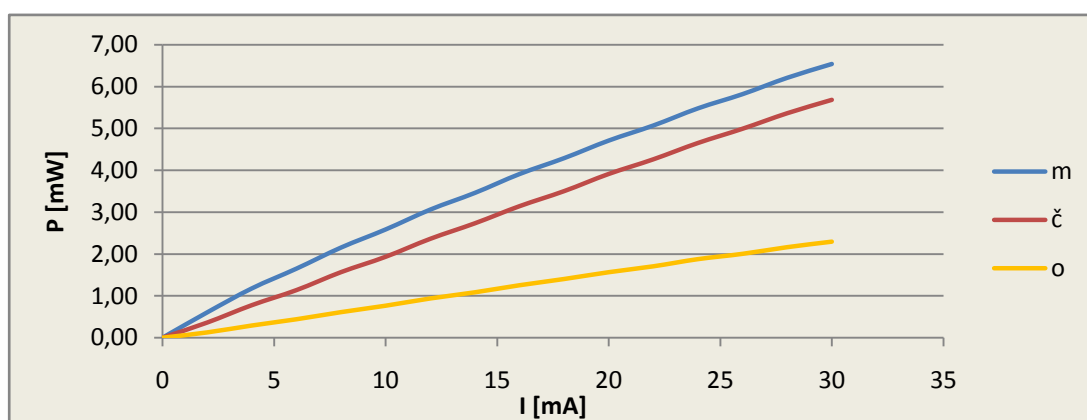


Obrázek 27: Zapojení pracoviště pro měření spektrální závislosti

## 5 MĚŘENÍ PROUDOVÉ ZÁVISLOSTI

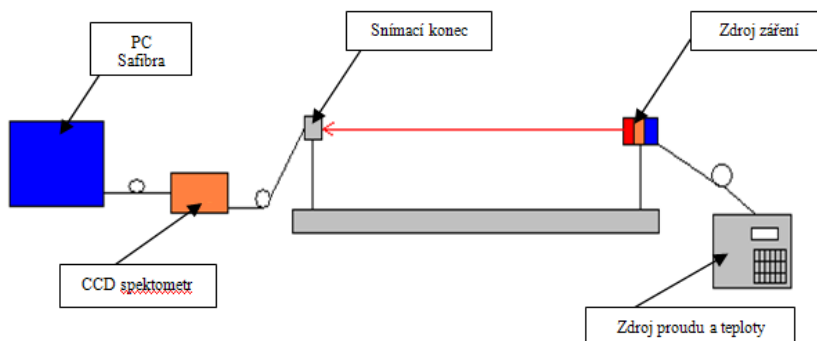
### 5.1 Měření proudové závislosti spektrálního složení světla LED s vlnovou délkou 650 nm, 610 nm a 470 nm.

Než jsem zapojil pracoviště k měření závislosti spektrální charakteristiky LED na proudu, proměřil jsem charakteristiky P/I daných LED graf 4. Z grafu je vidět lineární závislost výkonu LED na budicím proudu.



Graf 4: P/I Charakteristiky LED (modrá, červená a oranžová)

Poté bylo nutné zapojit pracoviště podle schématu zapojení měřicího pracoviště viz obrázek 28. Do přípravku k měření jsem postupně umístil dané LED s vlnovou délkou 650 nm (červená), 470 nm (modrá) a 610 nm (oranžová).



Obrázek 28: Zapojení měřicího pracoviště

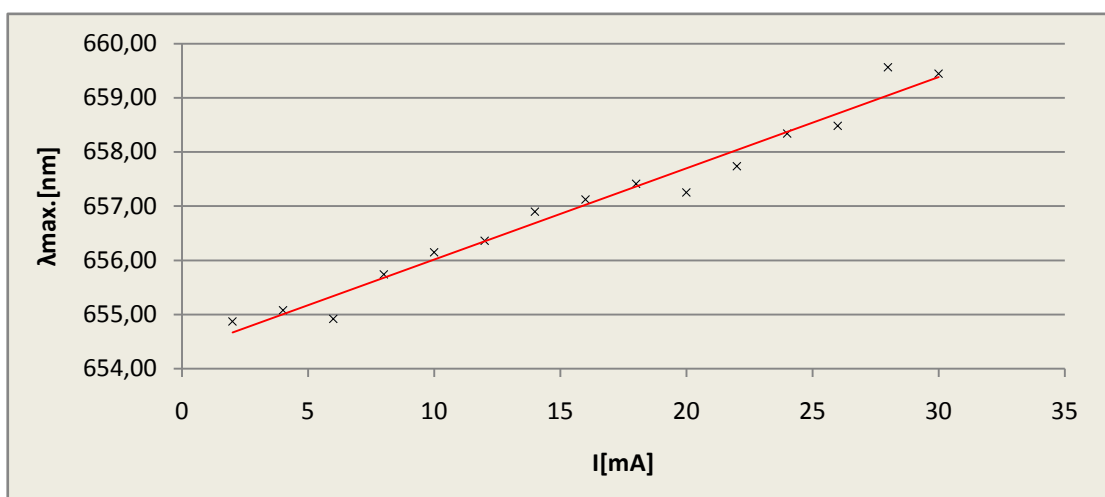
Po uvedení měřicího pracoviště do provozu jsem nejdříve nastavil počáteční hodnotu proudu na 30 mA a upravil vzdálenost měřené LED od snímacího konce CCD spektrometru, tak aby nedocházelo k saturaci.

Potom jsem nastavil hodnotu proudu na 0 mA a postupně hodnotu proudu zvyšoval po 2 mA až do maximální hodnoty 30 mA. Při každé hodnotě proudu byla z vyobrazeného spektra odečtena hodnota vlnové délky  $\lambda$  při maximálním výkonu a hodnotu šířky vyzařovaného spektra (FWHM). Pro každou hodnotu proudu bylo měření pětikrát opakováno, abych se vyhnul chybnému odečtu hodnot. Tato měření jsem postupně provedl pro všechny tři dané LED. Výsledné hodnoty měření všech tří LED jsou uvedeny v příloze I. Měření jednotlivých LED jsem zprůměroval, vypočetl směrodatnou odchylku  $\sigma$  a rozptyl  $\sigma^2$  měření. Výsledky měření jsem uvedl v tabulce 3, 4 a 5. Závislosti vlnové délky  $\lambda_{\max}$  a šířky spektra (FWHM) na proudu jsou uvedeny v grafu 5, 6, 7, 8, 9, 10.

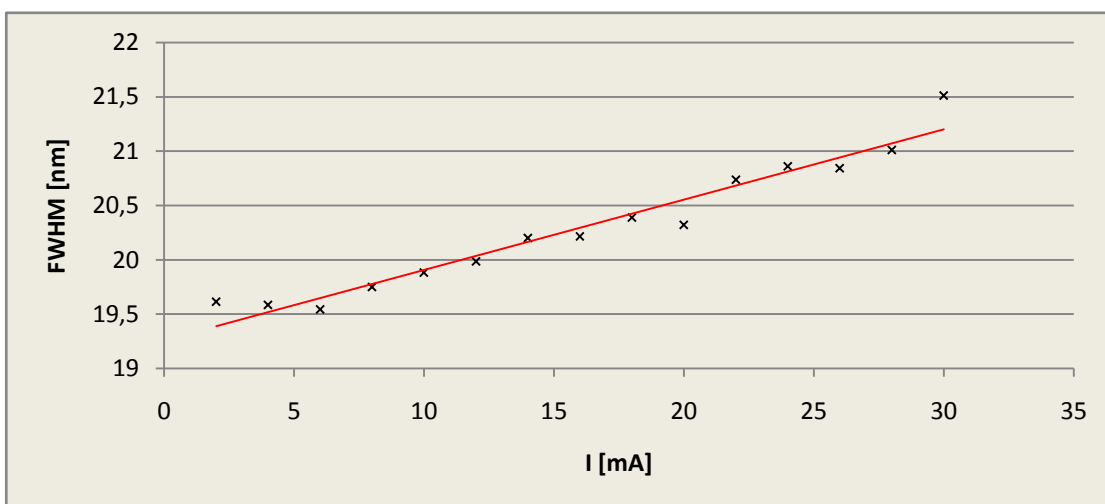
<b>I</b> <b>[mA]</b>	<b><math>\lambda_{\max}</math></b> <b>[nm]</b>	<b><math>\sigma</math></b> <b>[nm]</b>	<b><math>\sigma^2</math></b> <b>[nm]</b>	<b>FWHM</b> <b>[nm]</b>	<b><math>\sigma</math></b> <b>[nm]</b>	<b><math>\sigma^2</math></b> <b>[nm]</b>
2	654,87	0,47122	0,22205	19,61	0,62021	0,38466
4	655,08	0,36348	0,13212	19,58	0,53963	0,29120
6	654,92	0,27301	0,07454	19,54	0,69301	0,48026
8	655,74	0,12452	0,01550	19,75	0,54072	0,29237
10	656,15	0,25443	0,06474	19,88	0,72832	0,53046
12	656,36	0,39687	0,15750	19,98	0,64124	0,41118
14	656,90	0,22627	0,05120	20,20	0,41431	0,17165
16	657,12	0,13574	0,01842	20,21	0,59688	0,35626
18	657,41	0,27663	0,07652	20,39	0,59461	0,35356
20	657,25	0,36239	0,13132	20,32	0,21335	0,04552
22	657,74	0,48846	0,23859	20,74	0,25500	0,06502
24	658,34	0,19896	0,03958	20,86	0,13581	0,01844
26	658,48	0,27200	0,07398	20,84	0,34002	0,11562
28	659,57	0,32383	0,10486	21,01	0,01939	0,00038
30	659,45	0,23415	0,05483	21,51	0,30089	0,09054

Tabulka 3: Průměrné hodnoty  $\lambda_{\max}$  a FWHM diody LED 650 nm

Z grafů 5 a 6 lze vyčíst, že vlnová délka červené LED se s vyšší hodnotou proudu zvyšuje, vrchol spektra se posouvá k vyšším hodnotám z vlnové délky 654,87 nm do 659,57 nm a zároveň zvyšováním proudu dochází k rozšiřování šířky vyzařovaného spektra (FWHM) dané LED z hodnoty 19,61 nm na 21,51 nm.



Graf 5: Závislost vlnové délky  $\lambda_{\text{max}}$ . LED 650 nm na proudu

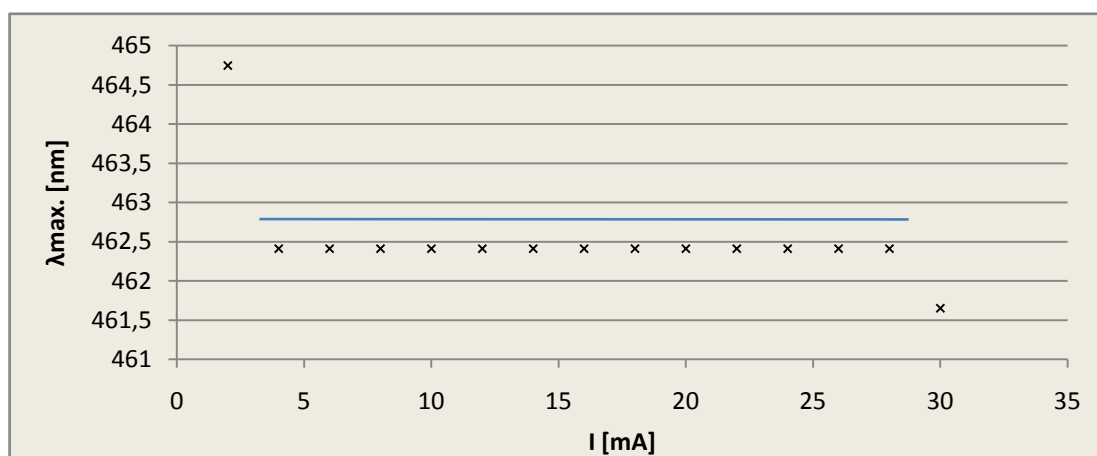


Graf 6: Závislost parametru FWHM LED 650 nm na proudu

I [mA]	$\lambda$ max. [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]	FWHM [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]
2	464,75	0,81283	0,66070	23,49	0,45572	0,20768
4	462,41	0	0	21,74	1,23051	1,51414
6	462,41	0	0	22,82	0,39892	0,15914
8	462,41	0	0	22,90	0,46378	0,21510
10	462,41	0	0	22,83	0,48833	0,23846
12	462,41	0	0	23,24	0,26635	0,07094
14	462,41	0	0	23,15	0,01744	0,00030
16	462,41	0	0	23,88	0,01600	0,00026
18	462,41	0	0	24,21	0,02400	0,00058
20	462,41	0	0	24,32	0,18000	0,03240
22	462,41	0	0	25,16	0,12159	0,01478
24	462,41	0	0	24,68	0,30246	0,09148
26	462,41	0	0	26,22	0,46923	0,22018
28	462,41	0	0	25,96	0,36350	0,13213
30	461,25	0,65856	0,43370	26,34	0,14505	0,02104

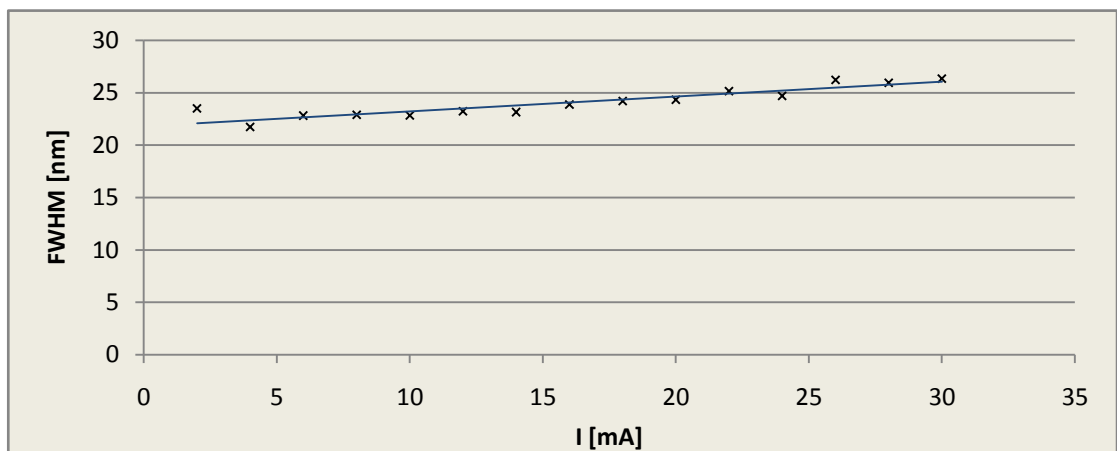
Tabulka 4: Průměrné hodnoty  $\lambda$  max. a FWHM diody LED 470 nm

Z grafů 7 a 8 lze vyčíst, že vlnová délka modré LED se s vyšší hodnotou proudu téměř nemění, hodnota vrcholu spektra se u modré LED pohybuje na hodnotě 462,41 nm. Šířka spektra (FWHM) vyzařovaného spektra dané LED se zvětšuje z hodnoty 23,49 nm na 26,34 nm.



Graf 7: Závislost vlnové délky  $\lambda$  max. LED 470 nm na proudu



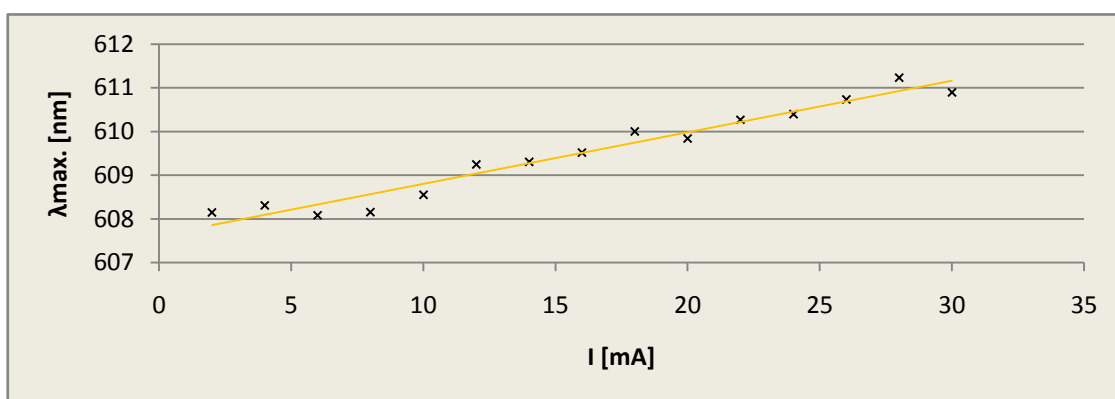


Graf 8: Závislost parametru FWHM LED 470 nm na proudu

I [mA]	$\lambda$ max. [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]	FWHM [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]
2	608,15	0,27600	0,07618	13,41	0,09600	0,00922
4	608,31	0,27433	0,07526	13,50	0,16107	0,02594
6	608,08	0,14000	0,01960	13,72	0,29312	0,08592
8	608,15	0,27503	0,07564	14,01	0,12893	0,01662
10	608,55	0,47254	0,22330	14,27	0,13094	0,01714
12	609,25	0,13032	0,01698	14,24	0,13951	0,01946
14	609,31	0,24467	0,05986	14,37	0,12750	0,01626
16	609,52	0,26680	0,07118	14,57	0,13312	0,01772
18	610,00	0,13182	0,01738	14,60	0,13673	0,01870
20	609,84	0,26658	0,07106	14,71	0,13106	0,01718
22	610,27	0,13991	0,01958	14,73	0,13455	0,01810
24	610,40	0,27961	0,07818	14,86	0,04665	0,00218
26	610,73	0,27433	0,07526	14,93	0,12847	0,01650
28	611,23	0,28937	0,08374	15,05	0,13251	0,01756
30	610,90	0,28167	0,07934	15,26	0,09196	0,00846

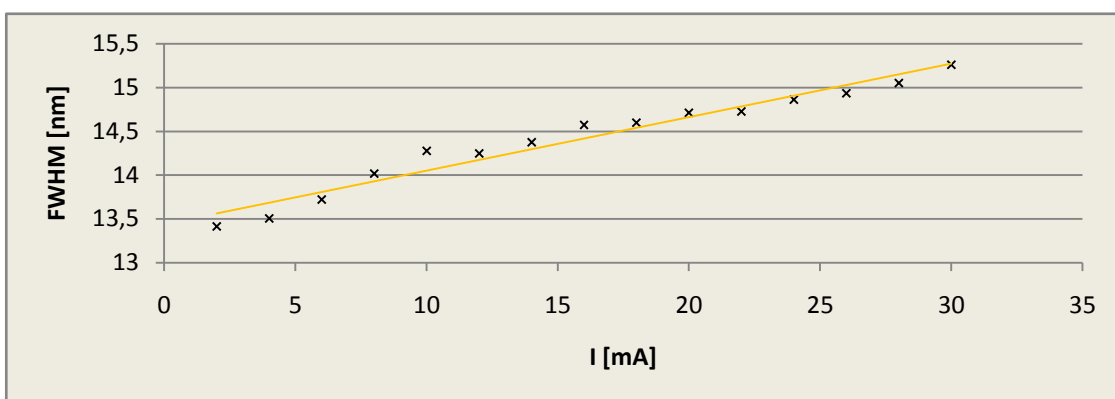
Tabulka 5: Průměrné hodnoty  $\lambda$  max. a FWHM diody LED 610 nm

Z grafů 9 a 10 lze vyčíst, že vlnová délka oranžové LED se s vyšší hodnotou proudu zvyšuje, vrchol spektra se posouvá z vlnové délky 608,08 nm do 611,23 nm směrem k vyšším hodnotám a zároveň zvyšováním proudu dochází k rozšiřování šířky spektra (FWHM) vyzařovaného spektra dané LED z hodnoty 13,41 nm na 15,26 nm.



Graf 9: Závislost vlnové délky  $\lambda$  max. LED 610 nm na proudu

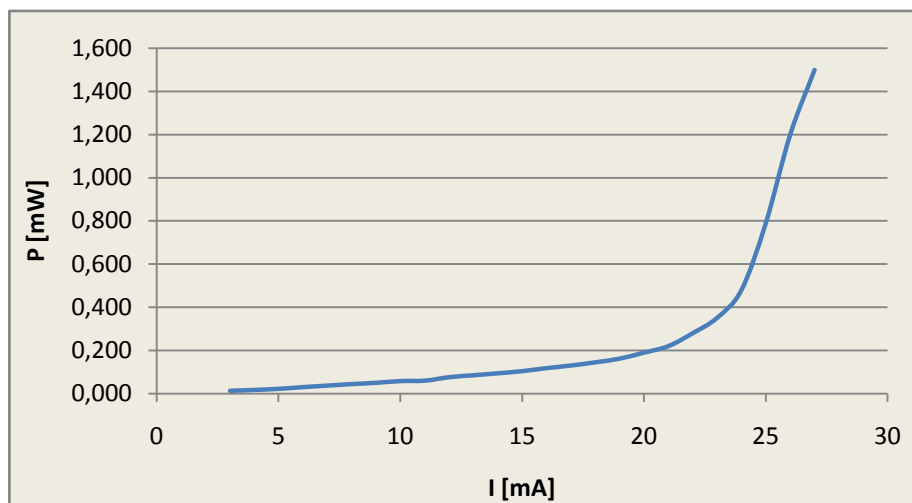
Při měření změn spektrálního složení světla LED v závislosti na změně proudu jsem zjistil rozdílné závislosti měřených LED. Měřením jsem zjistil, že nejmenší proudovou závislost má LED vlnové délky  $\lambda=470$  nm (modrá). Naopak největší závislost se projevila u LED  $\lambda=650$  nm (červená). Rozdílné závislosti byly způsobeny různou šířkou zakázaného pásu výrobních materiálů měřených LED a její závislosti na proudu. Naměřené hodnoty jsou srovnatelné s teoretickým chováním popsáním v kapitole 2 a 3.



Graf 10: Závislost parametru FWHM LED 610 nm na proudu

## 5.2 Měření proudové závislosti spektrálního složení světla laserové diody LD s vlnovou délkou 660 nm

Než jsem zapojil pracoviště k měření závislosti spektrální charakteristiky LD na proudu, proměřil jsem charakteristiku P/I graf 11.



Graf 11: P/I Charakteristika Laseru

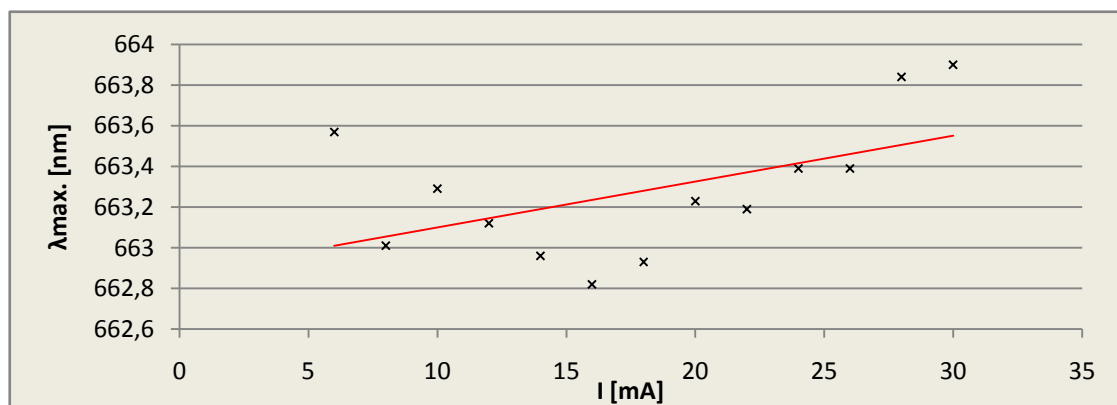
Při měření laserové diody jsem použil stejné zapojení jako u LED obrázek 28. LD 660 nm jsem umístil do přípravku k měření. Po uvedení měřicího pracoviště do provozu jsem stejně jako u LED upravil vzdálenost měřené LD od snímacího konce CCD spektrometru, tak aby nedocházelo k saturaci.

Potom jsem nastavil hodnotu proudu na 0 mA a postupně hodnotu proudu zvyšoval po 2 mA až do maximální hodnoty 30 mA. Při každé hodnotě proudu jsem z vyobrazeného spektra odečetl hodnotu vlnové délky  $\lambda$  při maximálním výkonu a hodnotu šířky vyzařovaného spektra (FWHM). Pro každou hodnotu proudu jsem měření pětikrát opakoval, abych se vyhnul chybnému odečtu hodnot. Výsledné hodnoty měření LD jsou uvedeny v příloze I. Tato měření jsem zprůměroval a vypočetl směrodatnou odchylku  $\sigma$  a rozptyl  $\sigma^2$  měření. Výsledky měření jsem uvedl v tabulce 6. Závislost vlnové délky  $\lambda_{\max}$  a FWHM na proudu je uvedena v grafu 12 a 13.

I [mA]	$\lambda$ max. [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]	FWHM [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]
6	663,57	0,45885	0,21054	18,63	0,65055	0,42322
8	663,01	0,22553	0,05086	16,05	0,50887	0,25894
10	663,29	0,13200	0,01742	14,69	0,34673	0,12022
12	663,12	0,39256	0,15410	14,18	0,56930	0,32410
14	662,96	0,44775	0,20048	13,91	0,48562	0,23582
16	662,82	0,45737	0,20918	13,20	0,48083	0,23120
18	662,93	0,39650	0,15722	12,52	0,43007	0,18496
20	663,23	0,45708	0,20892	11,98	0,59006	0,34818
22	663,19	0,42612	0,18158	10,96	0,69370	0,48122
24	663,39	0,26751	0,07156	10,25	0,92779	0,86080
26	663,39	0,16657	0,02774	8,76	1,08419	1,17546
28	663,84	0,73016	0,53314	6,80	1,20064	1,44154
30	663,9	0,46120	0,21270	4,88	1,93436	3,74174

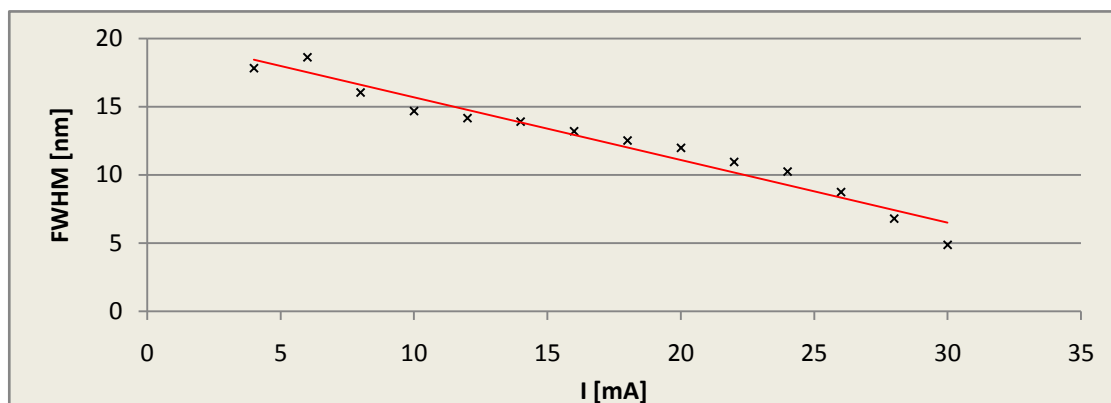
Tabulka 6: Průměrné hodnoty  $\lambda$  max. a FWHM diody LD 660 nm

Z grafů 12 a 13 lze vyčíst, že vlnová délka LD se s vyšší hodnotou proudu téměř nemění. Oproti LED zvyšováním proudu však dochází k velkému zúžení šířky vyzařovaného spektra (FWHM) dané LD z hodnoty 17,87 nm na 4,88 nm.



Graf 12: Závislost vlnové délky  $\lambda$  max. LD 660 nm na proudu

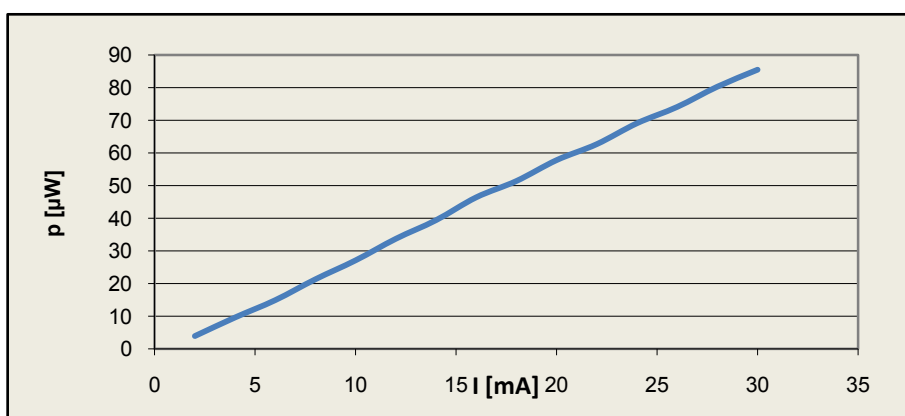
Posun vlnové délky může být způsoben zvyšováním Joulova tepla, které způsobuje zahřívání LD. Změna šířky spektra je dána vlastnostmi rezonátoru dané LD. Naměřené hodnoty jsou srovnatelné s teoretickým chováním popsaným v kapitole 2 a 3.



Graf 13: Závislost parametru FWHM LD 660 nm na proudu

### 5.3 Měření proudové závislosti spektrálního složení světla výkonové LED s vlnovou délkou 940 nm

Než jsem zapojil pracoviště k měření závislosti spektrální charakteristiky LD na proudu, proměřil jsem charakteristiku P/I graf 14.



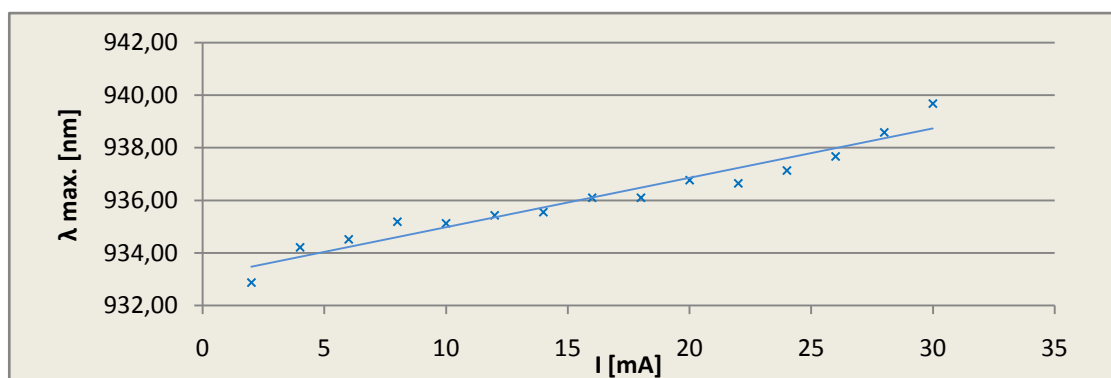
Graf 14: P/I Charakteristika výkonové LED

Při měření výkonové LED jsem použil stejné zapojení a postup měření jako u LED.

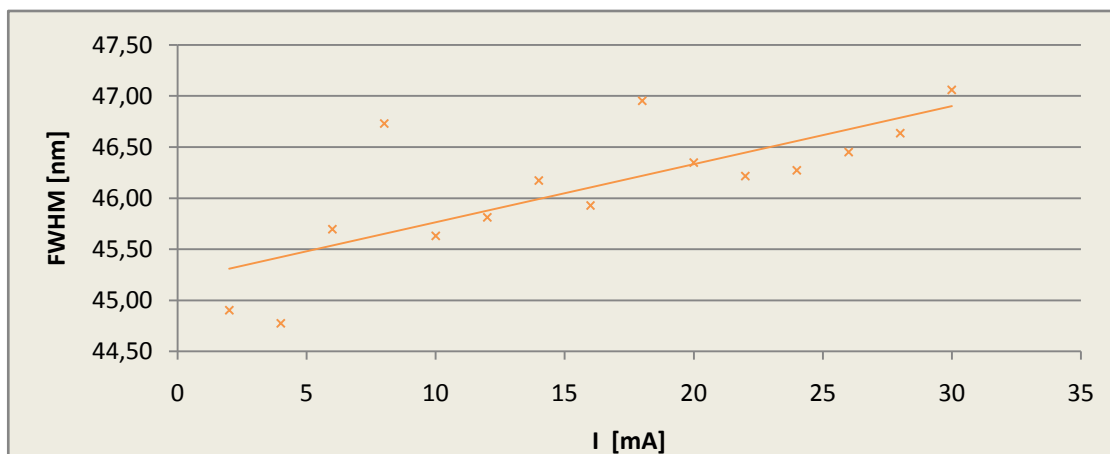
<b>I</b> [mA]	<b><math>\lambda</math> max.</b> [nm]	<b><math>\sigma</math></b> [nm]	<b><math>\sigma^2</math></b> [nm]	<b>FWHM</b> [nm]	<b><math>\sigma</math></b> [nm]	<b><math>\sigma^2</math></b> [nm]
2	932,88	0,88191	0,48160	44,90	0,77776	0,23194
4	934,22	1,28455	1,60327	44,77	1,65006	2,57046
6	934,52	1,02924	0,45063	45,69	1,05934	0,20306
8	935,19	0,95318	0,44337	46,73	0,90856	0,19658
10	935,13	0,45622	0,44091	45,63	0,20814	0,19440
12	935,43	1,29699	0,44091	45,81	1,68218	0,19440
14	935,56	1,51826	0,26836	46,17	2,30510	0,07202
16	936,10	1,64486	0,40735	45,93	2,70558	0,16594
18	936,10	1,30977	0,30870	46,95	1,71550	0,09530
20	936,77	1,71084	1,07930	46,35	2,92698	1,16490
22	936,65	1,96365	0,82379	46,22	3,85590	0,67862
24	937,13	1,94961	0,24153	46,27	3,80098	0,05834
26	937,68	1,74351	0,61002	46,45	3,03982	0,37212
28	938,59	1,30637	0,41108	46,63	1,70660	0,16898
30	939,68	1,71160	0,90276	47,06	2,92956	0,81498

Tabulka 7: Průměrné hodnoty  $\lambda$  max. a FWHM výkonové LED 940 nm

Z grafů 15 a 16 lze vyčíst, že vlnová délka výkonové LED se s vyšší hodnotou proudu zvyšuje, vrchol spektra se posouvá z vlnové délky 932,87 nm do 939,68 nm a zároveň dochází k rozšiřování šířky vyzařovaného spektra (FWHM) dané LED z hodnoty 44,90 nm na 47,06 nm.



Graf 15: Závislost vlnové délky  $\lambda$  max. výkonové LED 940 nm na proudu



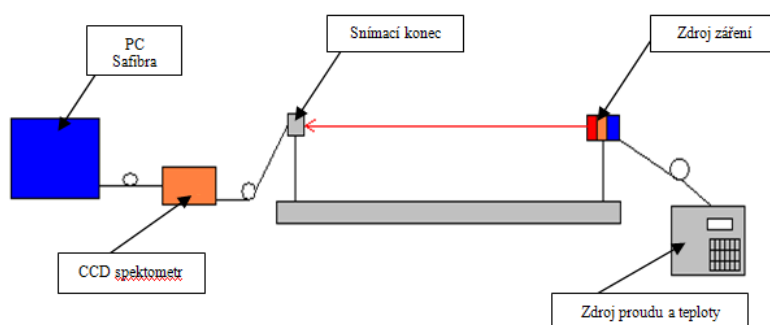
Graf 16: Závislost parametru FWHM výkonové LED 940 nm na proudu

Při měření změn spektrálního složení světla výkonové LED v závislosti na změně proudu jsem zjistil velkou závislost vlnové délky na proudu. Rozdílné závislosti byly způsobeny šířkou zakázaného pásu výrobního materiálu měřené výkonové LED a její závislosti na proudu. Naměřené hodnoty jsou srovnatelné s teoretickým chováním popsáním v kapitole 2 a 3.

## 6 MĚŘENÍ TEPLOTNÍ ZÁVISLOSTI

### 6.1 Měření teplotní závislosti spektrálního složení světla LED s vlnovou délkou 650 nm, 610 nm a 470 nm.

Nejdříve bylo nutné zapojit pracoviště podle schématu zapojení měřicího pracoviště obrázek 29. Do přípravku k měření jsem postupně umístil dané LED.



Obrázek 29: Zapojení měřicího pracoviště

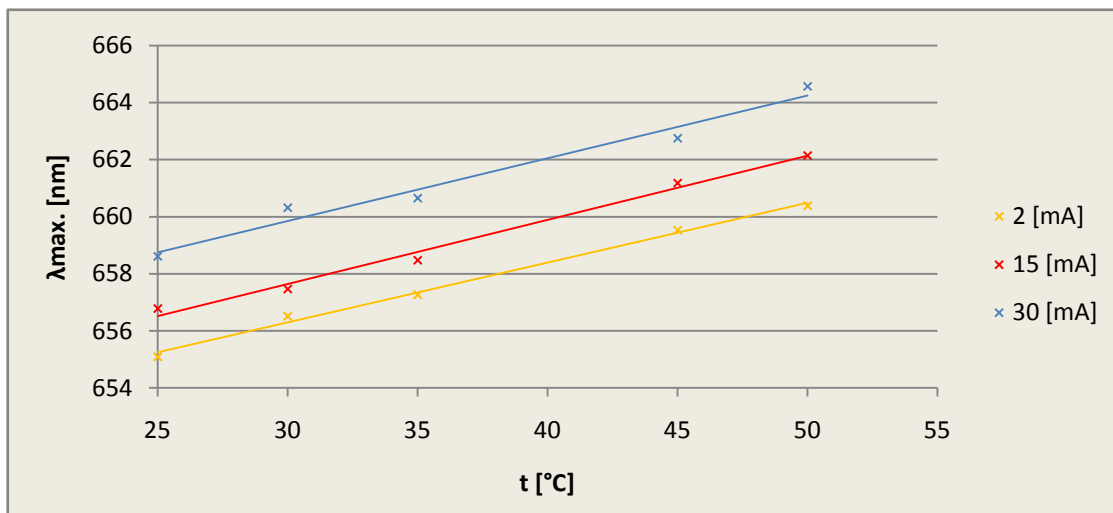
Po uvedení měřicího pracoviště do provozu jsem nejdříve nastavil počáteční hodnotu proudu na 30 mA a upravil vzdálenost měřené LED od snímacího konce CCD spektrometru, tak aby nedocházelo k saturaci. Potom jsem nastavil hodnotu proudu na 2 mA a teplotu na 25 °C. Postupně jsem teplotu zvyšoval po 5 °C až do maximální hodnoty 50 °C. Při každé hodnotě teploty jsem z vyobrazeného spektra odečetl hodnotu vlnové délky  $\lambda$  při maximálním výkonu a hodnotu šířky vyzařovaného spektra (FWHM). Pro každou teplotu jsem měření pětikrát zopakoval, abych se vyhnul chybnému odečtu hodnot. Stejný postup měření jsem opakoval pro hodnoty proudu 15 mA a 30 mA. Tato měření jsem postupně provedl pro všechny tři dané LED. Výsledné hodnoty měření všech tří LED jsou uvedeny v příloze I. Měření jednotlivých LED jsem zprůměroval a vypočetl směrodatnou odchylku  $\sigma$  a rozptyl  $\sigma^2$  měření. Výsledky měření jsem uvedl v tabulce 8, 9 a 10. Závislosti vlnové délky  $\lambda_{\max}$  a šířky spektra (FWHM) na teplotě jsou uvedeny v grafu 17, 18, 19, 20, 21 a 22.



t [°C]	I [mA]	$\lambda$ max. [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]	FWHM [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]
25	2	655,09	0,34673	0,12022	18,39	0,39650	0,15722
30	2	656,52	0,39650	0,15722	18,74	0,13600	0,01850
35	2	657,27	0,60374	0,36450	18,78	0,34360	0,11806
40	2	658,96	0,21503	0,04624	19,25	0,13600	0,01850
45	2	659,54	0,40800	0,16646	19,45	0,16657	0,02774
50	2	660,39	0,39343	0,15478	19,79	0,16657	0,02774
25	15	656,79	0,16657	0,02774	18,59	0,13200	0,01742
30	15	657,47	0,50513	0,25516	19,19	0,16497	0,02722
35	15	658,48	0,46120	0,21270	19,46	0,16657	0,02774
40	15	660,05	0,45106	0,20346	19,65	0,21503	0,04624
45	15	661,19	0,34360	0,11806	20,32	0,21189	0,04490
50	15	662,15	0,59281	0,35142	20,18	0,16497	0,02722
25	30	658,62	0,43007	0,18496	19,46	0,16657	0,02774
30	30	660,32	0,30411	0,09248	19,99	0,21503	0,04624
35	30	660,66	0,74125	0,54946	20,12	0,26903	0,07238
40	30	662,35	0	0	20,38	0,13807	0,01906
45	30	662,76	0,25443	0,06474	20,72	0,13200	0,01742
50	30	664,58	0,34673	0,12022	20,98	0,36515	0,13334

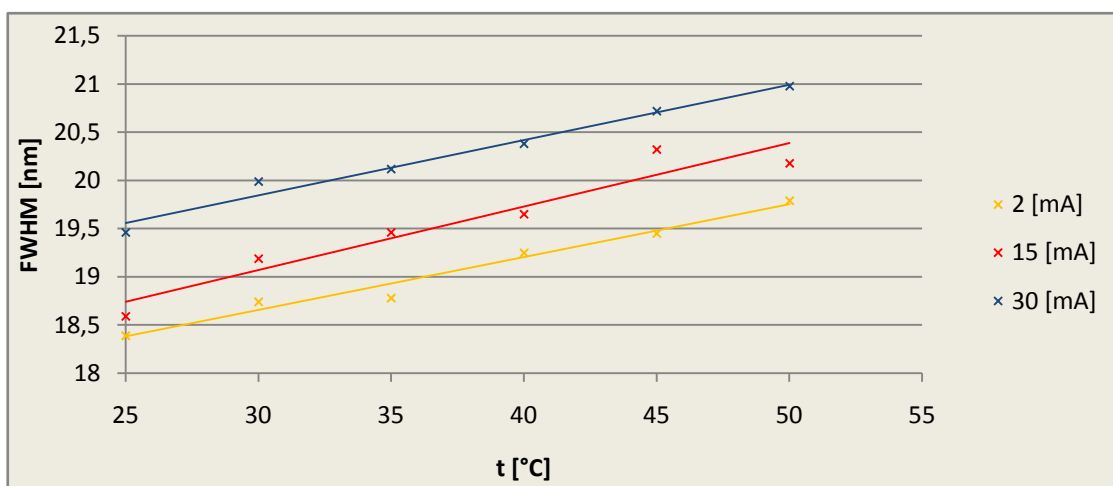
Tabulka 8: Průměrné hodnoty  $\lambda$  max. a FWHM diody LED 650 nm

Z grafu 17 lze vyčíst, že vlnová délka červené LED se s vyšší hodnotou teploty zvyšuje, vrchol spektra se u červené LED při proudu 2 mA posouvá z vlnové délky 655,09 nm do 660,39 nm. Při proudu 15 mA se posouvá z vlnové délky 656,79 nm do 662,15 nm a při proudu 30 mA se posouvá z vlnové délky 658,62 nm do 664,58 nm.



Graf 17: Závislost vlnové délky  $\lambda_{max}$  LED 650 nm na teplotě

Z grafu 18 lze vyčíst, že zvyšováním teploty zároveň dochází k rozšiřování šířky vyzařovaného spektra (FWHM) dané LED. Šířka spektra (FWHM) vyzařovaného spektra se zvětšuje při proudu 2 mA z hodnoty 18,39 nm na 19,79 nm. Při proudu 15 mA z hodnoty 18,59 nm do 20,18 nm a při proudu 30 mA z 19,46 nm do 20,98 nm.

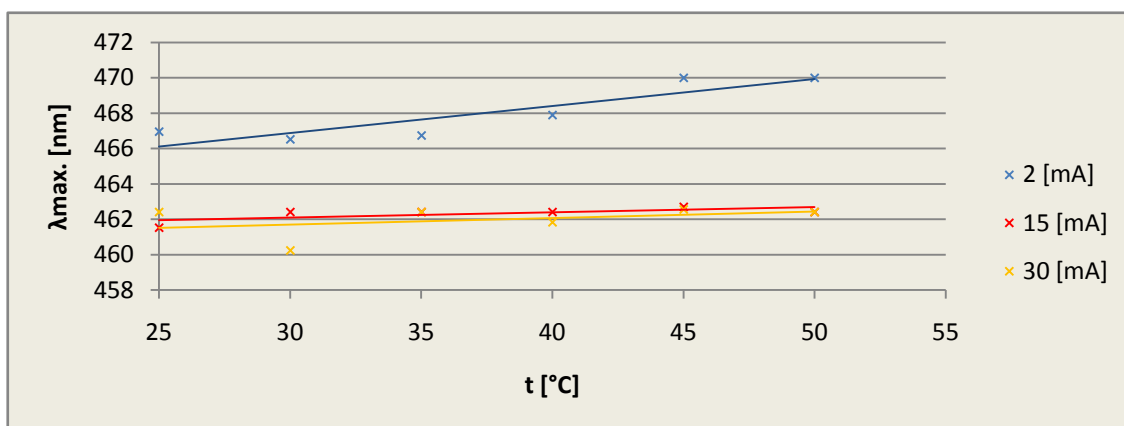


Graf 18: Závislost parametru FWHM LED 650 nm na teplotě

t [°C]	I [mA]	$\lambda$ max. [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]	FWHM [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]
25	2	466,96	0,17636	0,03110	22,82	0,41983	0,17626
30	2	466,53	0,62768	0,39398	23,33	0,28800	0,08294
35	2	466,75	0	0	22,96	0,17884	0,03198
40	2	467,91	1,32055	1,74386	23,54	0,61937	0,38362
45	2	470,00	0	0	24,62	0,26940	0,07258
50	2	470,00	0	0	24,69	0,17636	0,03110
25	15	461,54	1,15550	1,33518	24,58	1,04614	1,09442
30	15	462,41	0	0	24,44	0,84189	0,70878
35	15	462,41	0	0	23,06	3,08356	9,50834
40	15	462,41	0	0	24,87	0,35194	0,12386
45	15	462,70	0,35763	0,12790	25,66	0,78965	0,62354
50	15	462,41	0	0	25,95	0,27104	0,07346
25	30	462,41	0	0	26,19	0,17636	0,03110
30	30	460,24	1,77343	3,14506	26,41	0	0
35	30	462,41	0	0	26,84	0,41983	0,17626
40	30	461,83	1,15600	1,33634	27,70	0,48775	0,23790
45	30	462,56	0,29200	0,08526	27,48	0,88917	0,79062
50	30	462,41	0	0	27,19	0,70034	0,49048

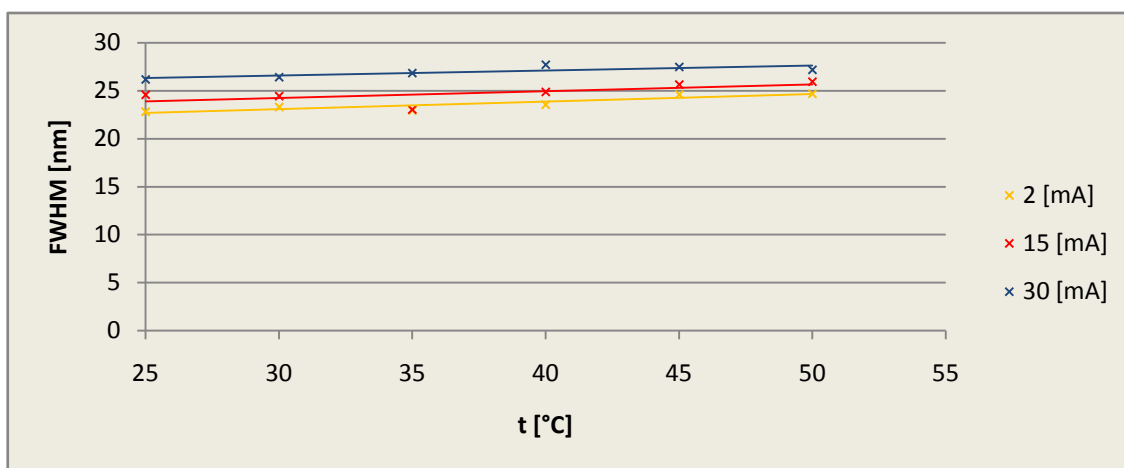
Tabulka 9: Průměrné hodnoty  $\lambda$  max. a FWHM diody LED 470 nm

Z grafu 19 lze vyčíst, že vlnová délka modré LED se s vyšší hodnotou teploty při proudu 15 mA a 30 mA téměř nemění. Ke změně dochází pouze při proudu 2 mA. Vrchol spektra se u modré LED při proudu 2mA posouvá z vlnové délky 466,96 nm do 470,00 nm.



Graf 19: Závislost vlnové délky  $\lambda$  max. LED 470 nm na teplotě

Z grafu 20 lze vyčíst, že zvyšováním teploty dochází k rozšiřování šířky (FWHM) vyzařovaného spektra modré LED. Šířka spektra (FWHM) vyzařovaného spektra modré LED se zvětšuje při proudu 2 mA z hodnoty 22,82 nm na 24,69 nm. Při proudu 15 mA z hodnoty 24,58 nm do 25,95 nm a při proudu 30 mA z 26,19 nm do 27,19 nm.

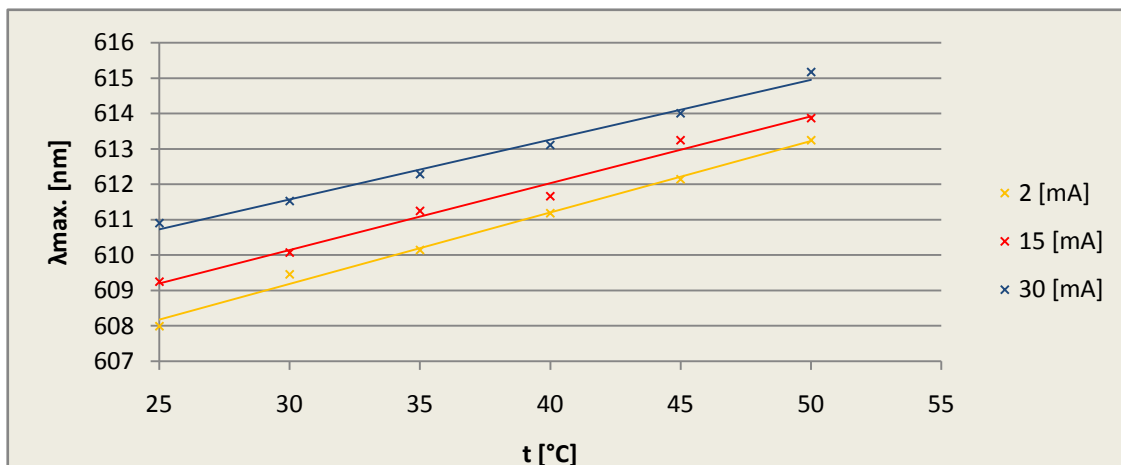


Graf 20: Závislost parametru FWHM LED 470 nm na teplotě

t [°C]	I [mA]	$\lambda$ max. [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]	FWHM [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]
25	2	608,00	0,14000	0,01960	13,39	0,14000	0,01960
30	2	609,46	0,33681	0,11344	13,66	0,17146	0,02940
35	2	610,15	0,45830	0,21004	13,80	0	0
40	2	611,19	0,25765	0,06638	14,06	0,13705	0,01878
45	2	612,15	0,43639	0,19044	14,48	0,00400	0
50	2	613,25	0,33681	0,11344	14,82	0,21823	0,04762
25	15	609,25	0,27600	0,07618	14,22	0,13600	0,01850
30	15	610,08	0,30858	0,09522	14,35	0,27651	0,07646
35	15	611,25	0,27551	0,07590	14,62	0,17146	0,02940
40	15	611,67	0,41267	0,17030	15,03	0,27551	0,07590
45	15	613,25	0,40097	0,16078	15,43	0,26035	0,06778
50	15	613,87	0,57849	0,33466	15,78	0,13905	0,01934
25	30	610,91	0,35106	0,12324	14,89	0,13807	0,01906
30	30	611,53	0,13600	0,01850	15,10	0,14000	0,01960
35	30	612,29	0,67606	0,45706	15,51	0,21821	0,04762
40	30	613,11	0,59217	0,35066	16,19	0,16904	0,02858
45	30	614,01	0,46592	0,21708	16,33	0,16657	0,02774
50	30	615,18	0,59171	0,35012	16,46	0,25765	0,06638

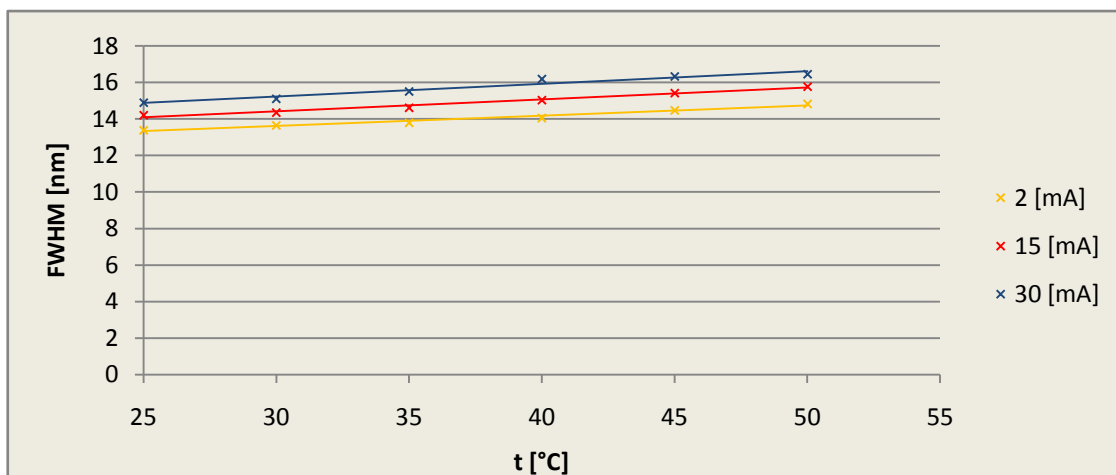
Tabulka 10: Průměrné hodnoty  $\lambda$  max. a FWHM diody LED 610 nm

Z grafu 21 lze vyčíst, že vlnová délka oranžové LED se s vyšší hodnotou teploty zvyšuje, vrchol spektra se u oranžové LED při proudu 2mA posouvá z vlnové délky 608,00 nm do 613,25 nm. Při proudu 15 mA se posouvá z vlnové délky 609,25 nm do 613,87 nm a při proudu 30 mA se posouvá z vlnové délky 610,91 nm do 615,18 nm.



Graf 21: Závislost vlnové délky  $\lambda_{max}$  LED 610 nm na teplotě

Z grafu 22 lze vyčíst, že zvyšováním teploty zároveň dochází jen k malému rozšiřování šířky (FWHM) vyzařovaného spektra dané LED. Šířka spektra (FWHM) vyzařovaného spektra oranžové LED se zvětšuje při proudu 2 mA z hodnoty 13,39 nm na 14,82 nm. Při proudu 15 mA z hodnoty 14,22 nm do 15,78 nm a při proudu 30 mA z 14,89 nm do 16,46 nm.



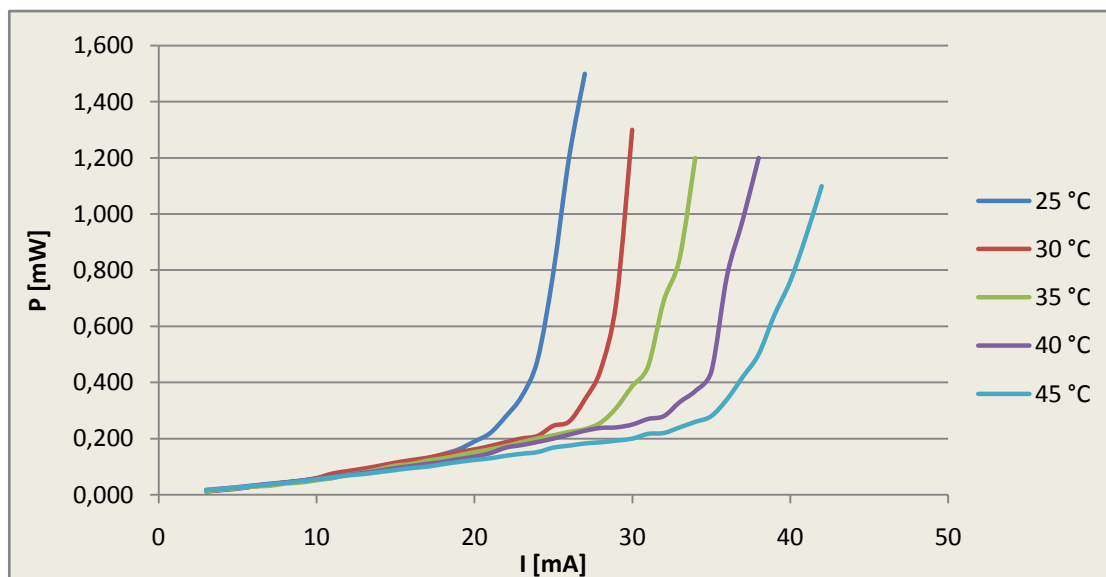
Graf 22: Závislost parametru FWHM LED 610 nm na teplotě

Při měření změn spektrálního složení světla LED v závislosti na okolní teplotě jsem zjistil rozdílné závislosti měřených LED. Měřením jsem zjistil, že nejmenší teplotní závislost má LED vlnové délky  $\lambda=470$  nm (modrá). Naopak největší závislost se projevila u LED  $\lambda=650$  nm (červená). Rozdílné závislosti byly způsobeny různou šířkou zakázaného pásu výrobních

materiálů měřených LED a její závislosti na teplotě. LED diody vykazují malou teplotní závislost. Naměřené hodnoty jsou srovnatelné s teoretickým chováním popsáním v kapitole 2 a 3.

## 6.2 Měření teplotní závislosti spektrálního složení světla LD s vlnovou délkou 660 nm

Než jsem zapojil pracoviště k měření závislosti spektrální charakteristiky LD na teplotě, proměřil jsem charakteristiky P/I dané LD pro teploty 25, 30, 35, 40 a 45 °C graf 23.



Graf 23: P/I Charakteristika laserové diody LD

Při měření teplotní závislosti laserové diody jsem použil stejné zapojení jako o LED obrázek 29. LD jsem umístil do přípravku k měření. Po uvedení měřicího pracoviště do provozu jsem stejně jako u LED upravil vzdálenost měřené LD od snímacího konce CCD spektrometru, tak aby nedocházelo k saturaci. Potom jsem nastavil teplotu na 25°C a hodnotu proudu postupně na 4 mA, 19 mA a 22 mA. Při každé hodnotě proudu jsem z vyobrazeného spektra odečetl hodnotu vlnové délky  $\lambda$  při maximálním výkonu a hodnotu šířky vyzařovaného spektra (FWHM). Měření jsem pětkrát zopakoval, abych se vyhnul chybnému odečtu hodnot.

Stejný postup měření jsem zopakoval pro hodnoty proudu:

4 mA, 23 mA, 27 mA při teplotě 30°C

4 mA, 27 mA, 30 mA při teplotě 35°C

4 mA, 33 mA, 36 mA při teplotě 40°C

4 mA, 36 mA, 41 mA při teplotě 45°C

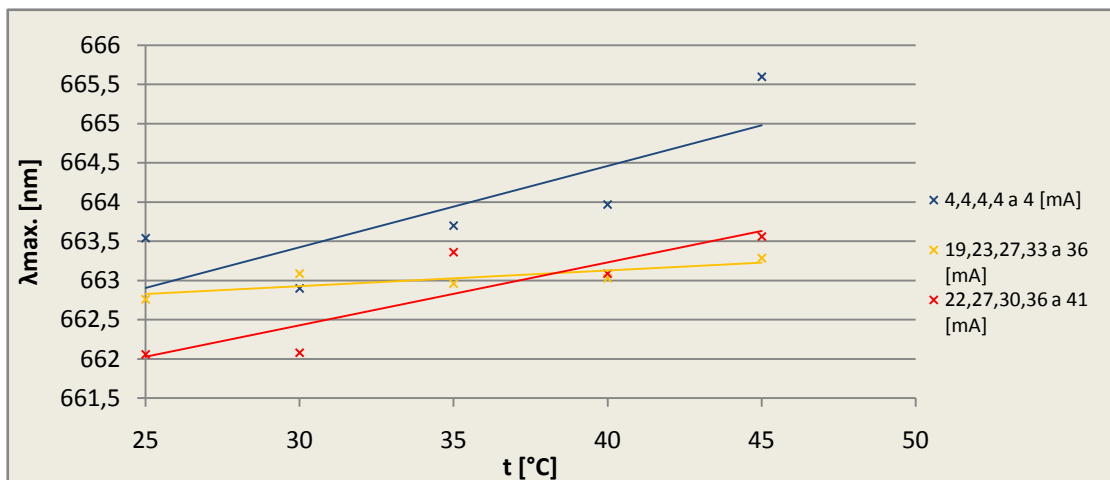
Výsledné hodnoty měření jsou uvedeny v příloze I. Tato měření jsem zprůměroval a vypočetl směrodatnou odchylku  $\sigma$  a rozptyl  $\sigma^2$  měření. Výsledky měření jsem uvedl v tabulce 11.

t [°C]	I [mA]	$\lambda$ max. [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]	FWHM [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]
25	4	663,54	0,26485	0,07014	17,91	1,08444	1,17602
30	4	662,90	0,50513	0,25516	18,15	0,27200	0,07398
35	4	663,70	1,11370	1,24034	17,88	0,75399	0,56850
40	4	663,97	0,75381	0,56822	18,76	0,92417	0,85410
45	4	665,60	0,45648	0,20838	18,89	0,61626	0,37978
25	19	662,76	0,25443	0,06474	12,57	0,43980	0,19342
30	23	663,09	0,75237	0,56606	10,09	0,39240	0,15398
35	27	662,96	0,65475	0,42870	8,26	0,46120	0,21270
40	33	663,03	0,00000	0,00000	3,32	0,13600	0,01850
45	36	663,29	0,13200	0,01742	3,12	0,25443	0,06474
25	22	663,06	0,40450	0,16362	11,2	0,79846	0,63754
30	27	662,08	0,39650	0,15722	6,43	0,21503	0,04624
35	30	663,36	0,36880	0,13602	6,77	0,30411	0,09248
40	36	663,09	0,39240	0,15398	3,18	0,50539	0,25542
45	41	663,56	0,16657	0,02774	2,64	0,39240	0,15398

Tabulka 11: Průměrné hodnoty  $\lambda$  max. a FWHM LD

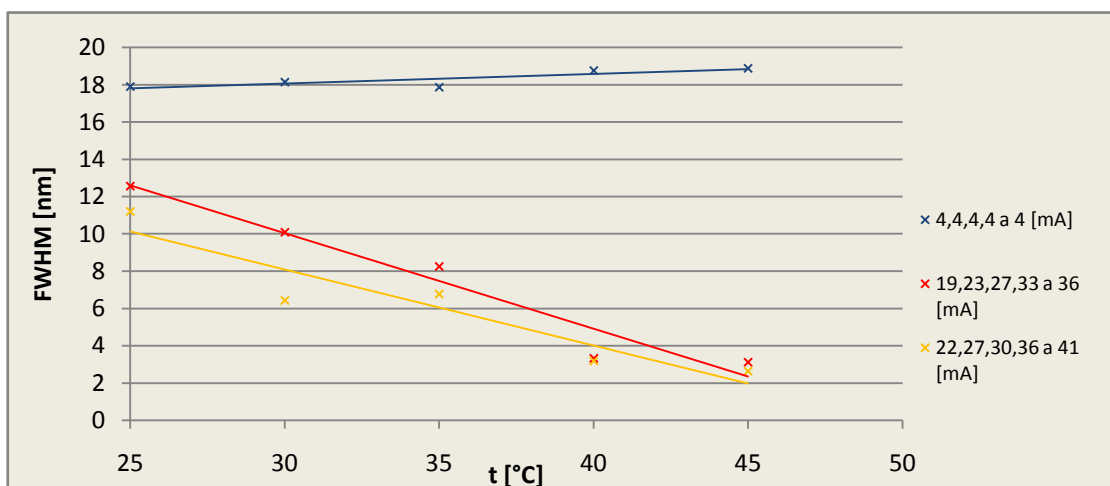
Z grafu 24 lze vyčíst, že vlnová délka LD se s vyšší hodnotou teploty zvyšuje, vrchol spektra se u LD při proudech 4 mA posouvá z vlnové délky 663,54 nm do 665,6 nm. Při proudech 19, 23, 27, 33 a 36 mA se posouvá z vlnové délky 662,76 nm do 663,29 nm a při proudech 22, 27, 30, 36 a 41 mA se posouvá z vlnové délky 663,06 nm do 663,56 nm.





Graf 24: Závislost vlnové délky  $\lambda_{max}$  LD 660 nm na teplotě

Z grafu 25 lze vyčíst, že zvyšováním teploty dochází k rozšiřování šířky vyzařovaného spektra (FWHM) LD. Šířka spektra (FWHM) vyzařovaného spektra LD se zvětšuje při proudech 4 mA z vlnové délky 17,91 nm do 18,89 nm. Při proudech 19, 23, 27, 33 a 36 mA z hodnoty 12,57 nm do 3,12 nm a při proudech 22, 27, 30, 36 a 41 mA z hodnoty 11,2 nm do 2,64 nm. Měřená LD vykazuje velkou teplotní závislost, způsobenou změnou velikosti krystalu a indexu lomu materiálu LD. Změny spektrálního složení světla měřené LD jsou srovnatelné a odpovídají teoretickému chování LD popsané v kapitole 2 a 3.



Graf 25: Závislost parametru FWHM LD 660 nm na teplotě

### 6.3 Měření teplotní závislosti spektrálního složení světla výkonové LED s vlnovou délkou 940 nm

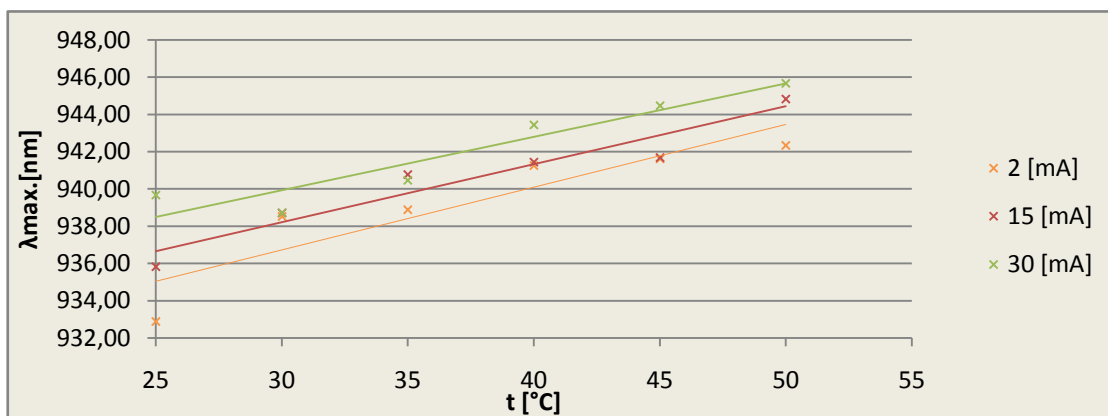
Při měření teplotní závislosti výkonové LED jsem použil stejné zapojení a postup měření jako u LED. Výsledné hodnoty měření jsou uvedeny v příloze I. Měření jsem zprůměroval a vypočetl směrodatnou odchylku  $\sigma$  a rozptyl  $\sigma^2$  měření. Výsledek měření jsem uvedl v tabulce 12. Závislosti vlnové délky  $\lambda_{\max}$  a šířky spektra (FWHM) na teplotě jsou uvedeny v grafu 26 a 27.

t [°C]	I [mA]	$\lambda_{\max}$ [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]	FWHM [nm]	$\sigma$ [nm]	$\sigma^2$ [nm]
25	2	932,88	0,88191	0,77776	44,90	0,48160	0,23194
30	2	938,53	0,41284	0,17044	44,02	0,64179	0,41190
35	2	938,89	1,12427	1,26398	44,60	0,79536	0,63260
40	2	941,26	1,42801	2,03922	43,82	0,49392	0,24396
45	2	941,62	1,88062	3,53672	43,45	1,12291	1,26092
50	2	942,35	1,48940	2,21830	43,97	0,66424	0,44122
25	15	935,83	1,57298	2,47425	46,05	0,29604	0,08764
30	15	938,71	0,29394	0,08640	46,62	0,36472	0,13302
35	15	940,77	1,44840	2,09786	46,87	0,52499	0,27562
40	15	941,44	1,13953	1,29852	47,14	0,45172	0,20405
45	15	941,68	1,16400	1,35490	47,26	x	x
50	15	944,83	1,20414	1,44994	x	x	x
25	30	939,68	1,71160	2,92956	47,06	0,90276	0,81498
30	30	938,71	0,29394	0,08640	46,90	0,57159	0,32672
35	30	940,47	0,81468	0,66370	48,27	0,44649	0,19935
40	30	943,44	0,52196	0,27244	47,68	1,08401	1,17507
45	30	944,47	0,12000	0,01440	x	x	x
50	30	945,68	2,20250	4,85102	x	x	x

Tabulka 12: Průměrné hodnoty  $\lambda_{\max}$  a FWHM výkonové LED 940 nm

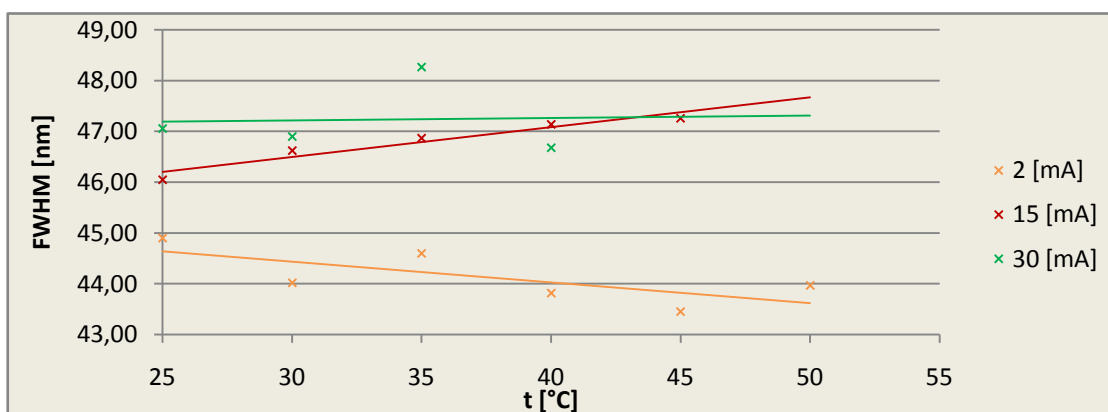
Z grafu 26 lze vyčíst, že vlnová délka výkonové LED se s vyšší hodnotou teploty zvyšuje, vrchol spektra se u výkonové LED při proudu 2mA posouvá z vlnové délky 932,88 nm do 942,35 nm. Při proudu 15 mA se posouvá z vlnové délky 935,83 nm do 944,83 nm a při

proudu 30 mA se posouvá z vlnové délky 939,86 nm do 945,68 nm. Závislost je způsobena šířkou zakázaného pásu výrobního materiálu měřené výkonové LED a její závislosti na teplotě. Výkonové LED vykazují velkou teplotní závislost. Naměřené hodnoty jsou srovnatelné s teoretickým chováním popsaným v kapitole 2 a 3.



Graf 26: Závislost vlnové délky  $\lambda$  max. výkonové LED 935 nm na teplotě

Z grafu 27 lze vyčíst, že zvyšováním teploty zároveň dochází k rozšiřování šířky (FWHM) vyzařovaného spektra dané LED. Šířka spektra (FWHM) vyzařovaného spektra výkonové LED se zmenšuje při proudu 2 mA z hodnoty 44,90 nm na 43,97 nm. Při proudu 15 mA a 30 mA bohužel nebylo možné měření provést pro teploty 45 a 50. Důvodem byl nedostatečný rozsah vlnových délek CCD spektrometru.



Graf 27: Závislost parametru FWHM výkonové LED 935 nm na teplotě

## 7 ZÁVĚR

V této diplomové práci jsem se věnoval problematice spektrálního složení světla zářivých zdrojů pro optické komunikace. Zjišťoval jsem vliv okolní teploty a budicího proudu na změnu spektrálního složení světla vybraných zdrojů záření. Pro vlastní měření jsem zvolil tři druhy LED vlnových délek  $\lambda=650,610$  a  $470$  nm, dále jednu LD o vlnové délce  $\lambda=660$  nm a výkonovou LED  $\lambda=940$  nm. Pro měření jsem použil přístroje, které se běžně využívají na katedře telekomunikační techniky FEI VŠB - TUO pro standardní laboratorní měření ve výuce. Jedná se o přípravek *Metering of thermal dependence* díky němuž lze měnit hodnotu budicího proudu a teplotu v okolí měřených zdrojů optického záření (LED a LD). Dále CCD spektrometr *OceanOptics Red Tide USB650*, jenž společně s PC a software Safibra 2.0 umožňuje zobrazení spektra daného zdroje záření, jeho upravení a uložení naměřených hodnot.

V první části měření jsem se zabýval vlivem budicího proudu na změnu spektrálního složení světla jednotlivých LED a LD. Před zapojením pracoviště k měření závislosti spektrálního složení světla na proudu, jsem proměřil charakteristiky P/I jednotlivých zdrojů záření. Po uvedení měřicího pracoviště do provozu jsem nejdříve upravil vzdálenost měřené LED od snímacího konce CCD spektrometru, tak aby nedocházelo k saturaci. Potom jsem postupně měnil hodnotu proudu od  $2$  mA až do maximální hodnoty  $30$  mA. Pro každou hodnotu proudu jsem z vyobrazeného spektra odečetl hodnotu vlnové délky  $\lambda$  při maximálním výkonu a hodnotu šířky vyzařovaného spektra (FWHM). Pro každou hodnotu proudu jsem měření pětikrát zopakoval, abych se vyhnul chybnému odečtu hodnot. Tato měření jsem postupně provedl pro všechny dané zdroje záření. Naměřené hodnoty a grafy jsou uvedeny v kapitole 5.

Při zvyšování hodnoty budicího proudu docházelo u LED  $\lambda=650$  nm,  $\lambda=610$  nm a  $\lambda=470$  nm k posunu maxima vlnové délky k vyšším hodnotám a zároveň rozšíření šířky spektra FWHM. Nejmenší závislost na budicím proudu se projevila u LED s vlnovou délkou  $\lambda=470$  nm (modré barvy), kde došlo jen k nepatrné změně maximální vlnové délky spektra. Naopak největší závislost z řad LED vykazovala dioda  $\lambda=650$  nm (červené barvy). U laserové diody se maximum vlnové délky téměř nezměnilo, ale došlo zde k velkému zúžení spektra. K největšímu posunu maxima vlnové délky došlo u výkonové diody.

Druhou část jsem zaměřil na vliv okolní teploty na změny spektrálního složení světla jednotlivých měřených zdrojů. Pro vlastní měření jsem použil stejné pracoviště jako v předchozím případě. Opět jsem upravil vzdálenost měřeného zdroje záření od snímacího

konce CCD spektrometru, tak aby nedocházelo k saturaci. Měření jsem provedl pro teploty 25°C až 50°C po 5°C pro tři předem dané hodnoty proudu. Při každé hodnotě teploty jsem z vyobrazeného spektra odečetl hodnotu vlnové délky  $\lambda$  při maximálním výkonu a hodnotu šířky vyzařovaného spektra (FWHM). Pro každou teplotu jsem měření pětikrát zopakoval, abych se vyhnul chybnému odečtu hodnot. Stejný postup měření jsem zopakoval pro všechny dané zdroje záření. Naměřené hodnoty a grafy jsou uvedeny v kapitole 6.

Při zvyšování okolní teploty docházelo u LED  $\lambda=650$  nm,  $\lambda=610$  nm a  $\lambda=470$  nm k posunu maxima vlnové délky k vyšším hodnotám a zároveň rozšíření šířky spektra FWHM. Nejmenší závislost na okolní teplotě se projevila u LED s vlnovou délkou  $\lambda=470$  nm (modré barvy), kde došlo jen k nepatrné změně maximální vlnové délky  $\lambda$  a šířky spektra FWHM. Velkou teplotní závislost vykazovala laserová dioda. K největšímu posunu maxima vlnové délky a změně šířky spektra došlo u výkonové diody.

Cílem měření bylo posoudit vliv okolní teploty a budicího proudu na spektrální složení světla zářivých zdrojů. Výsledky měření poukázaly na rozdílné spektrální závislosti měřených koherentních a nekoherentních zdrojů, odpovídajících teoretickému chování zdrojů záření popsaných v kapitole 2 a 3, způsobené především rozdílnou šířkou zakázaného pásu materiálu jednotlivých zdrojů záření a její závislosti na proudu a teplotě. Dále pak velké teplotní závislosti koherentních zdrojů záření. Naměřené hodnoty jsou srovnatelné s hodnotami katalogových listů jednotlivých zdrojů záření uvedených v příloze II. Chování, které jsem zjistil, je podrobněji popsáno v kapitole 5 a 6. Nepřesnosti v měření mohly být způsobeny vlivem okolních rušivých zdrojů záření.

Naměřené hodnoty a zjištěné poznatky se mohou stát důležitým parametrem při výběru vhodného zdroje záření pro optické komunikace. Dalším zajímavým tématem pro DP by mohlo být: Měření teplotní závislosti spektrálního složení světla zářivých zdrojů po nižší teploty do 25 °C.

## 8 LITERATURA

- [1] BOHÁČ, Leoš. *Optické komunikační systémy* [online]. [cit. 3.4.2011] Dostupné na World Wide Web: [www.comtel.cz/files/download.php?id=4815](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4815)
- [2] BOHÁČ, Leoš. *Optické zdroje - Lasery* [online]. [cit. 3.4.2011] Dostupné na World Wide Web: [www.comtel.cz/files/download.php?id=2329](http://www.comtel.cz/files/download.php?id=2329)
- [3] DOLEČEK, Jaroslav. *Optoelektronika a optoelektronické prvky*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 154 s.
- [4] DVOŘÁČEK, Petr. *Spolehlivost laserových diod v pásmu 1500 nm*. ČVUT Praha
- [5] FUKA, Josef, HAVELKA, Bedřich. *Optika a atomová fyzika – Optika*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961. 847 s.
- [6] HORGOSOVÁ, Kateřina. *Měření teploty okolí pomocí braggovských vláknově-optických mřížek*. VŠB Ostrava 2009.
- [7] HULICIUS, Eduard. *Optoelektronika – polovodičové zdroje záření* [online]. [cit. 3.4.2011] Dostupné na World Wide Web: <http://archiv.otevrenaveda.cz/users/Image/default/C1Kurzy/NH2006pdf/7.pdf>
- [8] INPHORA. *Measuring Average LED Intensity* [online]. [cit. 3.4. 2011] Dostupné na World Wide: [http://www.inphora.com/LED\\_intensity.pdf](http://www.inphora.com/LED_intensity.pdf)
- [9] KOUDELKA, Petr. *Optické zdroje*. FEI VŠB Ostrava, 2010.
- [10] LUKÁŠ, Michal. *Laserové diody 2 - Typy a struktury laserových diod* [online]. [cit. 3.4.2011] Dostupné na World Wide: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01043/index.html>
- [11] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna záření* [online]. [cit. 3.4.2011] Dostupné na World Wide Web: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [12] MATAL, Jan. *Realizace dvoukanálového optického vysílače s řízeným zpožděním*. VŠB Ostrava 2009.

- [13] MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. *LEDs Are Still Popular (and Improving) after All These Year*. [online]. [cit. 4.4.2011] Dostupné na World Wide: <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/1883>
- [14] MPRESENT s.r.o. *Laserové diody – Část 3. Typy LD* [online]. [cit. 3.4.2011] Dostupné na World Wide Web: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=35006](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=35006)
- [15] SALEH, Bahaa.E.A., TEICH, Malvin Carl. *Základy fotoniky, svazek 3*. 1.vyd. Praha: Matfyzpress, 1995. s. 437-775.
- [16] SAFIBRA s.r.o. *Safibra 2.0 (Synchronous Optical Measuring System Software)* [CD] 1994-2004.
- [17] WILFERT, Otakar. *Optoelektronika*. 1.vyd. Brno, VUT Brno, 2002. 121 s.

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**Příloha I:** Naměřené hodnoty proudové a teplotní závislosti spektrálního složení světla

**Příloha II:** Katalogové listy jednotlivých zdrojů záření



